

## 1. 千代田実験水路の目的

治水対策として十勝川中流部に整備された「千代田新水路」の一部を活用して、「千代田実験水路」が平成19年に完成しました。

この「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。



図1 千代田新水路の施設配置

## 2. 千代田実験水路の諸元と観測施設

実験水路は分流堰の4門のゲートのうち1門を利用してつくられており、低水路幅30m、堤防高4mの断面で、長さ1300m、河床勾配約1/500となっています(表1、図2、3)。実験水路の上流端のゲートで流量をコントロールすることができ、実物大での実験が可能です。

今まで縮尺模型実験では解明できなかった現象や実河川では観測が非常に困難であった現象などについて、この千代田実験水路を用いることで解明することが可能になります。

表1 千代田実験水路諸元

項目	諸元
実験水路長	1300 m
実験水路断面	低水路幅 30 m、堤防高 4 m
河床勾配	1/500

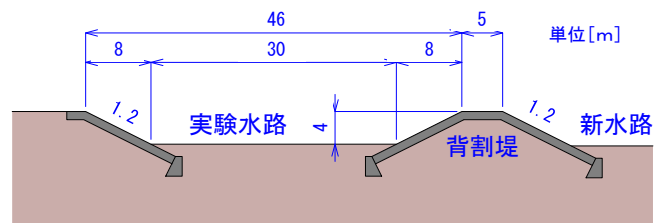


図2 実験水路断面形



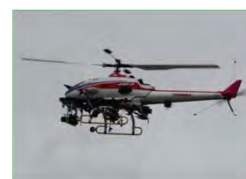
掃流砂を採取する装置  
(バケツ式掃流砂採取器)



掃流砂を採取する装置  
(土研式掃流砂採取器)



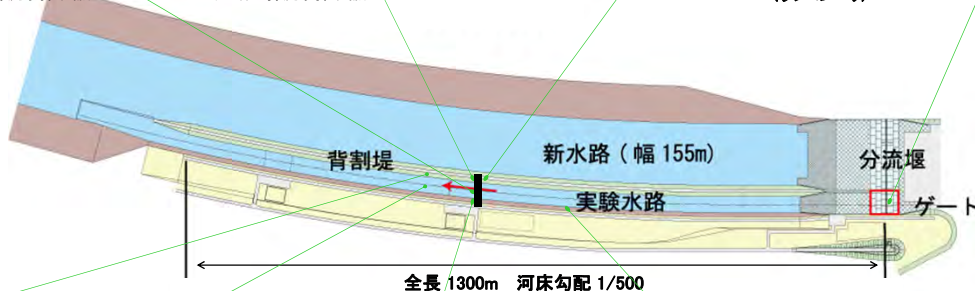
浮遊砂を採取する装置  
(ハンドーン式採水器)



実験状況撮影  
(ラジコンヘリ)



流量調節施設  
(起伏式ゲート:幅43m)



全長 1300m 河床勾配 1/500



破壊実験において堤防の崩壊状況を計測する装置  
(加速度センサー)



水面下の流速・河床高を計測する装置  
(航ワイヤー式ADCP観測船)



表面流速を計測する装置  
(電波式流速計)



水位を計測する装置  
(電波式水位計)



河床や氾濫域の形状を計測する装置  
(マルチレーザースキャン)



実験水路全体  
(低水路幅: 30 m)

図3 実験水路平面図と各観測機器



## 3.実験水路での研究計画(案)

現場における個々の技術的課題を解決するための技術開発、河川工学に係る体系的・重点的な技術開発のため、北海道開発局と寒地土木研究所との共同研究により、以下のテーマを実験研究長期計画として設定しています。現在は平成20年度からテーマⅠの破堤拡幅機構の解明のための研究を中心に実施しています。

表 2 実験研究長期計画のテーマ

テーマ	長期メインテーマ(実験例)
Ⅰ	堤防・保護工の機能評価技術の向上 (破堤拡幅機構の解明、保護工の機能検討)
Ⅱ	治水と環境を両立した樹林管理手法の確立 (河道内樹林群の流れの解明、橋脚による樹木閉塞メカニズムの解明)
Ⅲ	流域土砂管理の精度向上 (混合粒径河床の土砂動態解明、河床波の抵抗則等の解明)
Ⅳ	河道設計技術の向上 (観測機器・手法の開発、複断面やアイスジャム河川の流れの解明)
Ⅴ	洪水擾乱後の生態系変化の把握 (洪水擾乱の影響把握、植生侵入メカニズムの解明)
Ⅵ	水防技術・意識の向上 (水防工法の機能検証、水防訓練、住民への防災教育)

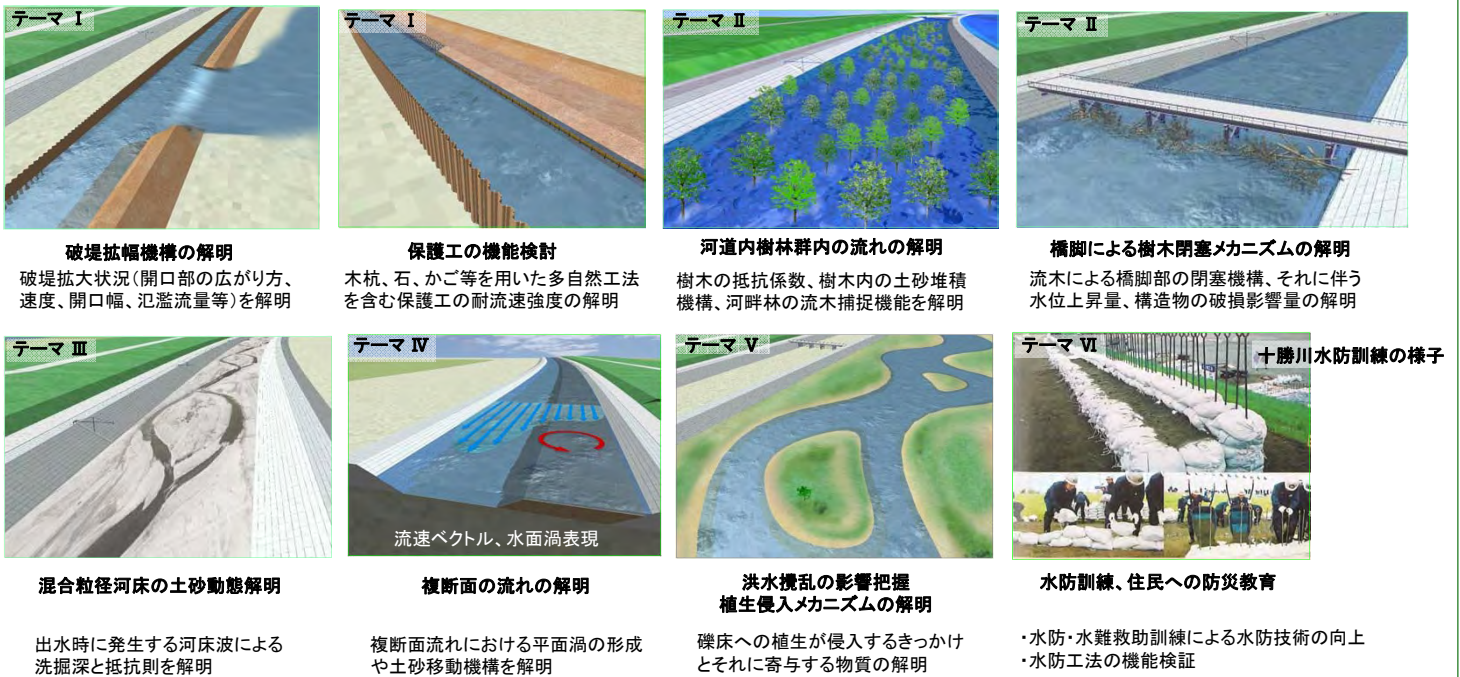


図 4 各研究テーマの実験イメージ

## 4.破堤拡幅機構の解明

### 研究テーマⅠ(破堤拡幅機構に関する実験)

#### 【背景】

近年、台風や集中豪雨などによ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ています。なかでも堤防決壊(破堤)による被害は甚大ですが、破堤のプロセスはよく分かっておらず、河川堤防の破堤機構の解明は、水害被害の軽減に向けて重要な課題です。破堤要因の8割以上が越水に起因するものであると言われており、越水破堤現象のうち、特にこれまでに未解明な点が多い破堤拡幅機構に関する知見を得ることは重要です。

#### 【目的】

これまでの破堤に関する調査研究は、主に縮尺模型実験などを中心に行われてきました。千代田実験水路では、実スケールで、しかも実河川と同様に河道の流れに対して縦断的に配置された堤防からの横越流による破堤実験が可能で、破堤進行時の堤体及び水理量の時系列の観測データを得ることにより、破堤進行過程を解明することを目的としています。

#### 【実験スケジュール】

千代田実験水路における越水破堤実験は、前例のない規模の実スケール実験です。そのため、まず、予備実験により各種計測手法の確認や基本的な破堤進行過程の把握を行い、そこで得られた知見によって実験条件を決定し、本実験を実施しました。

表 3 実験スケジュール

年度	実施内容
H20~21年度	予備実験
H22~23年度	本実験



石狩川水系石狩川の破堤氾濫 (S56.8洪水)



信濃川水系五十嵐川諏訪地区の破堤氾濫状況 (2004.7.13 新潟豪雨洪水災害調査委員会報告書より)

図 5 破堤氾濫状況



## ① 実験条件

堤防の基本形状は、高さ3m、天端幅3m、法面勾配1:2.0です。実験水路の断面形状を図7に示します。

実験は、表4に示す4ケースを実施しました。各ケースは、Case1の基本形状に対し、Case2:流量が小さい場合、Case3:堤体材料がシルト質の場合、Case4:天端幅が広い場合について、破堤進行過程への影響に着目して実験を実施しました。

なお、今回の実験では、堤体は裸堤(芝を張らない土堤)とし、設定した箇所から破堤拡幅が始まるように堤体に切欠部を設けています。また、通水流量に限界があるため河道幅に制約があるなど、条件を限定して実験を行っています。

表 4 実験ケース

ケース	流量	堤体土質	堤体天端幅
Case1	70m <sup>3</sup> /s	砂礫	3m
Case2	35m <sup>3</sup> /s	砂礫	3m
Case3	70m <sup>3</sup> /s	細粒分	3m
Case4	70m <sup>3</sup> /s	砂礫	6m

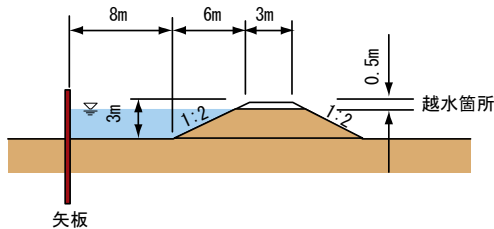


図 7 破堤部の実験水路横断形状(基本形状)

## ② 観測項目

主な観測は以下に示す項目のものを実施しました。

- ・水路内水位(電波式水位計・水圧式水位計)
- ・氾濫域水位(水圧式水位計)
- ・流量観測(ADCP観測船・電波式流速計)
- ・流況観測(PIV手法、3D画像解析)
- ・破堤形状(堤体内部に設置した加速度センサーの流出による堤体崩壊状態の感知)
- ・実験状況(カメラ・ビデオ撮影)

## ③ 実験状況

破堤進行状況とともに、氾濫流量や破堤拡幅幅の時間変化等を整理しました。(図8、図9)

図8より、越水初期段階では氾濫流量はほとんど増加していませんが、破堤の拡幅が始まると氾濫流量が急激に増加しています。その後、氾濫流量がピークに達した後、各ケースで差はあるものの、ほぼ一定の水位を保って推移しています。

なお、Case3では越水開始後から破堤拡幅開始に至るまでの時間が長かったり、Case2では破堤の拡幅速度が小さかったなど、堤体材料や天端幅等の違いにより破堤進行状況に違いがあることが分かりました。

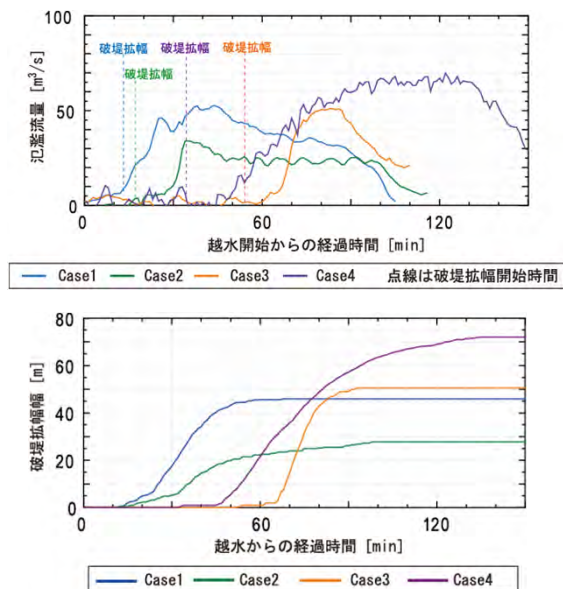


図 8 氾濫流量と破堤拡幅幅の時間変化



図 6 実験全体風景

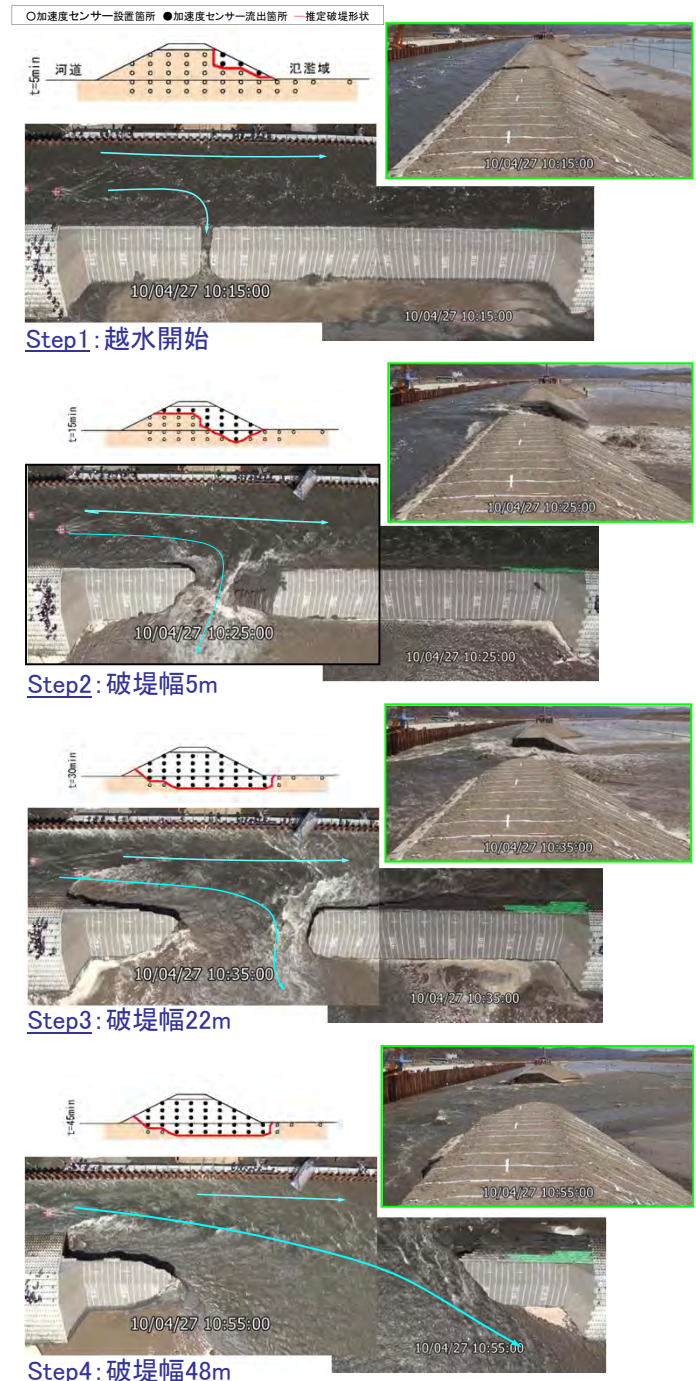


図 9 破堤の進行過程 (Case1)

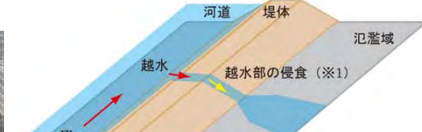


堤防の破堤進行過程は4つの段階に分類できることが分かりました

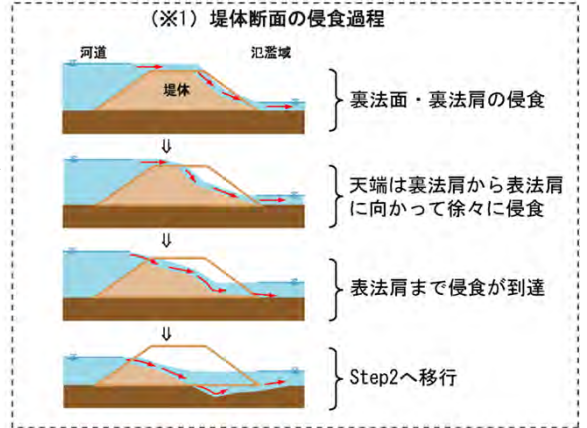
④ 実験結果

堤防の破壊進行状況は図10に示す4つのステップで整理ができることが分かりました。

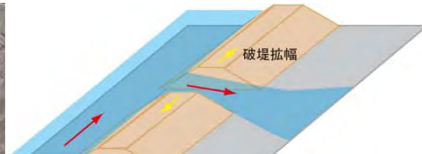
Step1 [初期破堤段階]



- 越水開始後、越水部の裏法面・裏法肩が侵食される。
- 天端は裏法肩から表法肩に向かって徐々に侵食される。
- 氾濫流量は増加しない。

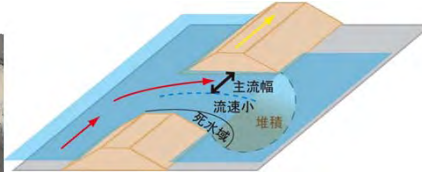


Step2 [拡幅開始段階]

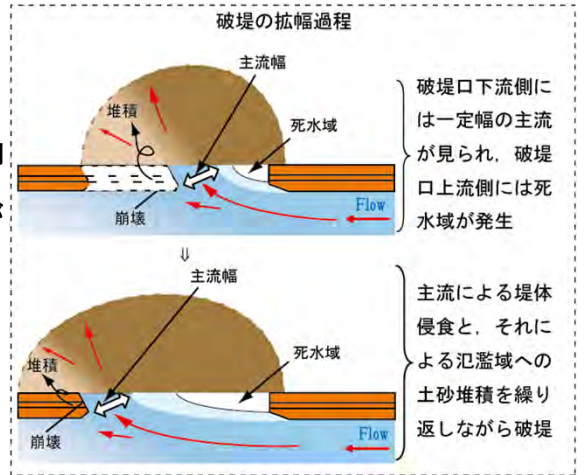


- 越水部の表法肩まで侵食が到達すると、急激に断面が侵食されて、破堤拡幅が上下流方向に徐々に進行する。
- 氾濫流量が増加し始める。

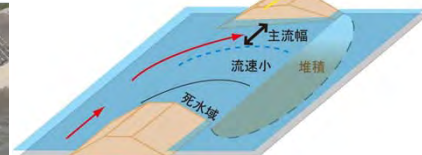
Step3 [拡幅加速段階]



- 堤体断面の大半が侵食されると、破堤拡幅が急激に進行し進行方向は主に下流側となる。
- 破堤口下流の流速が早くなり、この流れが堤体にぶつかり堤体を侵食しながら破堤が下流方向に進行する。
- 氾濫流量がピークを迎える。



Step4 [拡幅減速段階]



- 下流方向への堤体侵食と氾濫域の土砂堆積を繰り返しながら、氾濫流の主流部がほぼ一定の幅で下流へ移動する。
- 氾濫流量はほぼ一定で推移し、破堤拡幅速度は遅くなる。
- 破堤口の下流端は、氾濫域側に顕著に斜め形状となって破堤が進行する。

図 10 破堤進行過程のまとめ

破堤氾濫終了後の河道や氾濫域の状況を図11に示します。また標高別に色づけしたものを図12に示します。破堤に伴い、破堤部から上流の河道の河床が低下するとともに、堤体や河道内の土砂が流出し、氾濫域に堆積している状況がわかります。

氾濫域で流れが拡散し流速が低下すると、破堤口に近い方から砂礫分、砂分と、粒径の大きな土砂から順に堆積している。

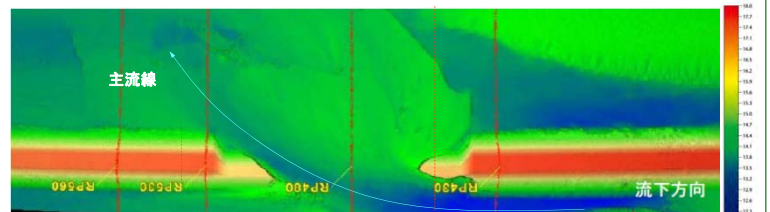
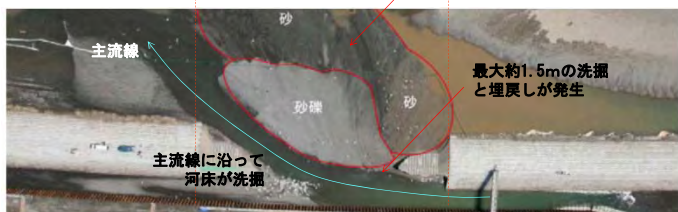


図 11 通水終了後の河道や氾濫域の状況 (Case1)

図 12 通水終了後の河道や氾濫域の地形形状 (Case1)

堤体崩壊量と水理量(水深や流速等)との関係について整理しました

⑤ 破堤進行過程と水理量

破堤幅幅について、水理量を用いた定量的な評価手法の検討を行いました。

検討は、a)堤体崩壊量の定量化、b)実験結果による堤体崩壊量の算出、c)破堤部の水理量の定量化を行い、これらを整理しCase1~4の無次元堤体崩壊量と堤体に作用する無次元掃流力を求め、d)堤体崩壊量と掃流力の関係について整理しました。

a) 堤体崩壊量の定量化

河川の土砂移動量は掃流砂量式で表現されます。代表的な既往の掃流砂量式(1)を参考に、無次元堤体崩壊量 $q_*$ を式(2)で表現します。無次元堤体崩壊量 $q_*$ は図13に示す堤体崩壊量から式(3)を用いて算出します。堤体の崩壊量と掃流力について整理を行い、堤体崩壊は氾濫流による堤体土塊の掃流現象として表せるものと考え、堤体崩壊量を掃流砂量として、堤体に作用する無次元掃流力との関係で整理することとしました。

$$q_B = 8(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5} \sqrt{sgd^3} \quad (1)$$

$$q_* = \frac{q_B}{\sqrt{sgd^3}} = \alpha_* (\tau_* - \tau_{*c})^{\beta_*} \quad (2)$$

$$q_* = \frac{dV}{dt} \frac{1}{\left(\sqrt{sgd_{50}^3 B_m}\right)} (1 - \lambda) \quad (3)$$

ここで、 $q_B$ : 単位幅あたりの掃流砂量、 $\tau_*$ : 無次元掃流力、 $\tau_{*c}$ : 無次元限界掃流力、 $s$ : 砂粒の水中比重、 $g$ : 重力加速度、 $d$ : 砂粒の粒径、 $q_*$ : 無次元堤体崩壊量、 $\alpha_* \cdot \beta_*$ : 係数、 $V$ : 堤体崩壊量、 $t$ : 時間、 $d_{50}$ : 砂粒の50%通過粒径、 $B_m$ : 堤体下幅、 $\lambda$ : 空隙率を表します。

b) 堤体崩壊量の算出

堤体内や地盤に設置した加速度センサーの記録結果を用いて、基礎地盤を含む堤体崩壊量を求めました(図13参照)。

越水直後の堤体崩壊量はわずかですが、その後、堤体の破堤幅幅の進行にあわせて急激に崩壊量が増大し、ピークに達したのち減少するという過程を経ることが分かりました。

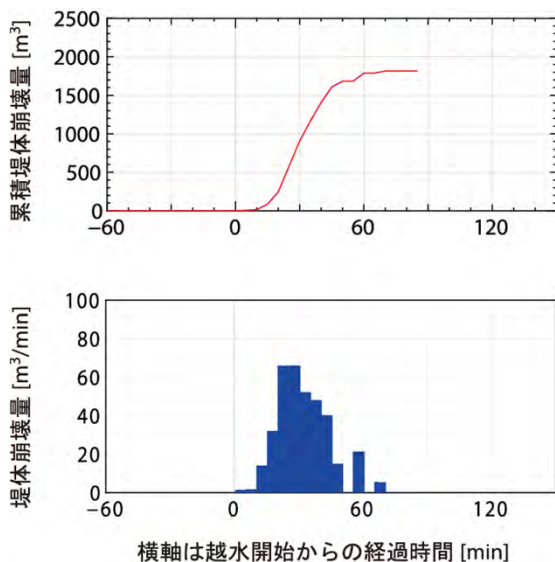


図13 堤体崩壊量(Case1)

c) 破堤部水理量の定量化

破堤幅幅の進行は、開口部下流端の堤体に流れがぶつかりながら進行しています。よって、破堤幅幅現象の評価にあたっては、図14に示すように、破堤開口部近傍の水理量を用いることとしました。

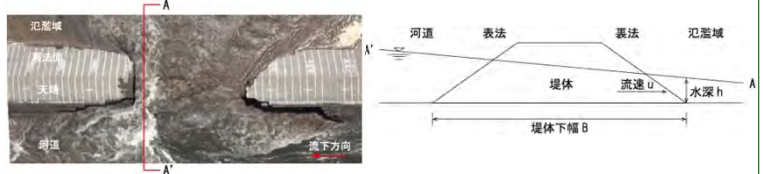


図14 破堤部水理量の算出

破堤開口部に作用する無次元掃流力 $\tau_*$ は式(4)より求め、破堤開口部の裏法近傍の流速 $u$ と実験水路の粗度係数 $n$ はマンニングの式を整理した式(5)を適用します。次に式(4)と(5)から無次元掃流力 $\tau_*$ を式(6)で求めました。また、限界無次元掃流力 $\tau_{*c}$ は岩垣の式より求めています。

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{sgd} = \frac{h i_e}{sd} \quad (4)$$

$$i_e = \frac{u^2 n^2}{4 h^3} \quad (5)$$

$$\tau_* = \frac{u^2 n^2}{sd_{50} h^3} \quad (6)$$

ここで、 $u_*$ : 摩擦速度、 $s$ : 砂粒の水中比重、 $g$ : 重力加速度、 $d$ : 粒径、 $h$ : 水深(ここでは、破堤開口部の水深 $h$ )、 $i_e$ : エネルギー勾配、 $u$ : 流速(PIV画像解析により求めた平均流速値)、 $n$ : 粗度係数(ここでは実験水路の値0.023)、 $h$ : 水深(3D画像解析により求めた水深)、 $d_{50}$ : 砂粒の50%通過粒径を表します。

d) 堤体崩壊量と掃流力の関係

Case1~4の実験結果より、式(3)、式(6)から無次元堤体崩壊量と無次元掃流力を求め、関係式(7)の係数 $\alpha_* \cdot \beta_*$ を求めます。

無次元堤体崩壊量と堤体に作用する無次元掃流力の関係を図15に示します。

堤体特性や土質は各ケースで異なるものの、プロットした結果は相関性があることが分かりました。無次元堤体崩壊量と破堤開口部周辺の無次元掃流力の関係が掃流砂量式に近い形で表すことができることが分かりました。

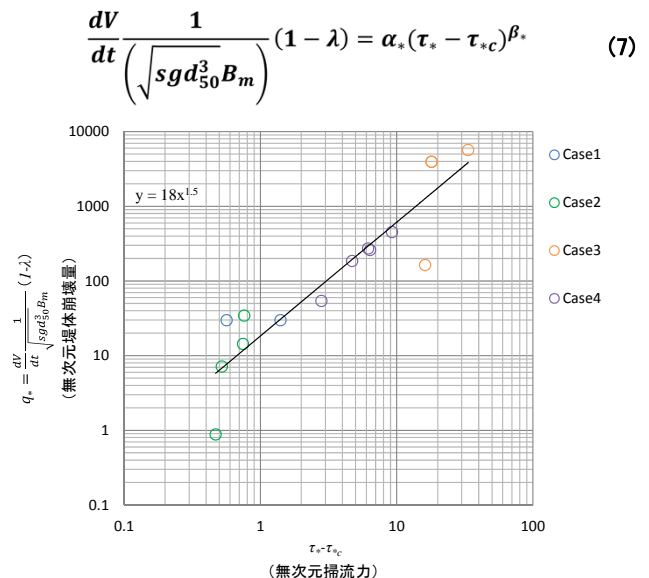


図15 無次元堤体崩壊量と堤体に作用する無次元掃流力