

水工学シリーズ 12-A-8

# 十勝川千代田実験水路における越水破堤実験

土木研究所 寒地土木研究所

柿沼 孝治

土木学会  
水工学委員会・海岸工学委員会

2012 年 8 月

# 十勝川千代田実験水路における越水破堤実験

## LEVEE BREACH EXPERIMENT AT THE CHIYODA EXPERIMENTAL CHANNEL

柿沼 孝治

Takaharu KAKINUMA

### 1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第4次評価報告書によると、気候システムの温暖化には疑う余地がないとされており<sup>1)</sup>、将来の降水量増加に伴い現計画が目標とする治水安全度は著しく低下し、浸水・氾濫の危険性が増えることが想定されている<sup>2)</sup>。なかでも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<sup>3)</sup>。近年では治水対策案の一つとして、決壊しない堤防・決壊しづらい堤防も挙げられているが<sup>4)</sup>、現状では技術的に困難であると言われている<sup>5)</sup>。越水破堤に関する研究は様々な

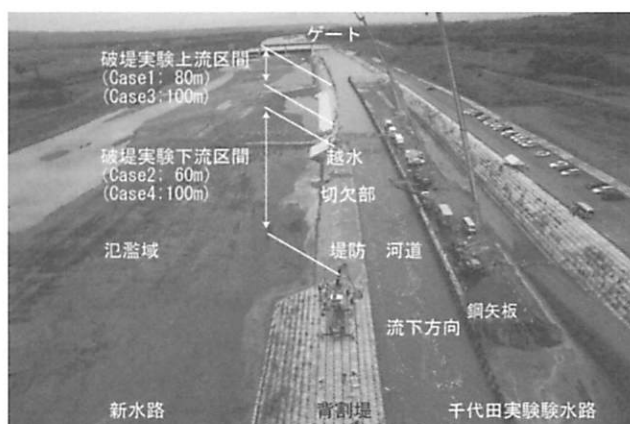


図-1 千代田実験水路における実験の様子

観点・手法で進められており、島田らはそれらを体系的に整理している<sup>6)</sup>。越水破堤現象は実災害を時系列で観測した事例がなく、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な部分が多い。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。また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対策技術の向上、ハザードマップの精度向上など、その成果を行政へ還元することも期待できる。国土交通省北海道開発局と(独)土木研究所寒地土木研究所では2008年度から十勝川千代田実験水路<sup>7)</sup>(以下、千代田実験水路)において実スケールでの越水破堤実験を行ってきた<sup>6) 8) 9)</sup>。図-1に示すように、千代田実験水路において河道流有・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。本論文では実験結果を整理し、越水をきっかけとした破堤拡幅進行過程を明らかにした。また蓄積されている既往の知見がどこまで実現象に適用可能か検討を行った。最後に破堤拡幅速度に寄与する因子について検討を行った。

### 2. 実験概要

#### 2.1 実験水路・堤体形状

実験水路の形状を図-2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75m/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。

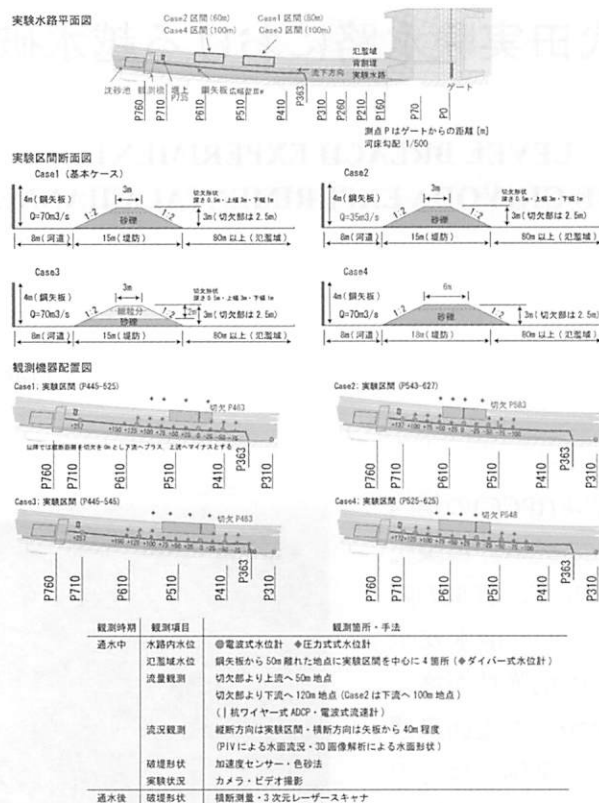


図-2 実験水路概要

|       | 堤体・水路形状 |    |     |     |     |       | 目標<br>流量 | 実験<br>実施 |    | 築堤後の<br>経過年数 | 備考              |
|-------|---------|----|-----|-----|-----|-------|----------|----------|----|--------------|-----------------|
|       | 土質      | 高さ | 天端幅 | 法勾配 | 水路幅 | 河床勾配  |          |          |    |              |                 |
| Case1 | 砂礫      | 3m | 3m  | 1:2 | 8m  | 1/500 | 70m³/s   | 2010年    | 4月 | 約4年          | 基本ケース<br>流量変化   |
| Case2 |         |    |     |     |     |       | 35m³/s   |          |    |              |                 |
| Case3 | 細粒分     | 3m | 3m  | 1:2 | 8m  | 1/500 | 70m³/s   | 2011年    | 4月 | 約1年          | 堤体土質変化<br>天端幅変化 |
| Case4 | 砂礫      |    |     |     |     |       |          |          |    |              |                 |

図-3 実験条件

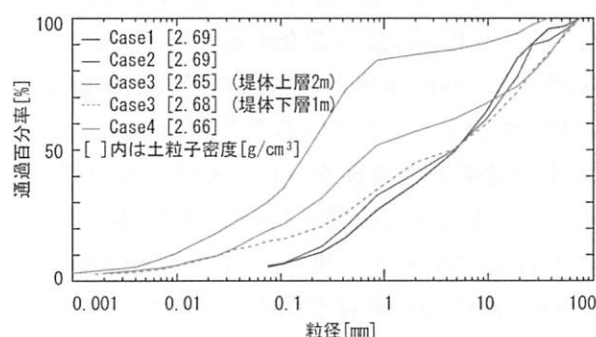


図-4 堤体材料の粒度分布

氾濫域は新水路(水路幅 80m 以上)を利用した。図-3 に実験条件を示す。Case1 を基本ケースとし、Case2 は河道流況(通水流量を半分程度)、Case3 は堤体土質(細粒分が多い土質)、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-4 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。

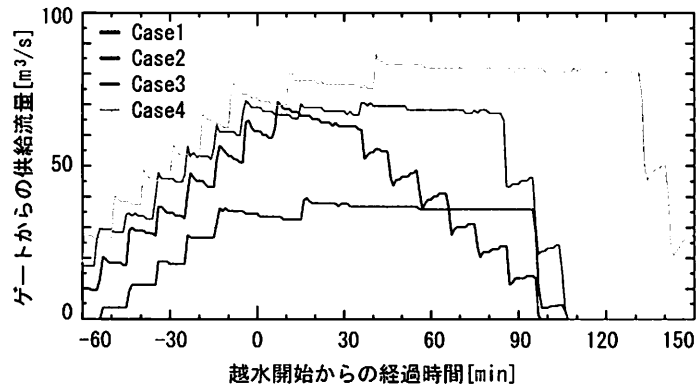


図-5 ゲートからの供給流量

## 2.2 観測方法

主な観測項目・観測位置は図-2 に示す通りである。使用した観測機器・手法については、過去の実験で確立したものと同様である<sup>6) 7) 8) 9)</sup>。

## 2.3 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-5 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 は他ケース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、80m/s 程度まで流量を増加させている。

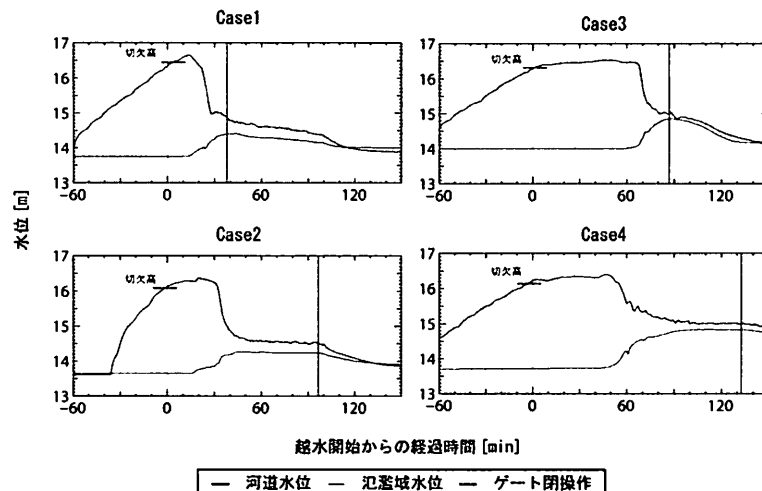


図-6 切欠部の河道水位と氾濫域水位

## 3. 実験結果

### 3.1 水位観測結果

切欠部の河道と氾濫域の水位観測結果を図-6 に示す。河道水位については、Case2・3・4 では、目標の越流水深まで上昇したのち一定水位が継続し、Case1 では、目標の越流水深まで上昇したのちゲートからの通水量が減少したため、水位が低下している。

氾濫水位については、河道水位の低下後、上昇が始まり、その後河道水位との水位差がなくなっている。

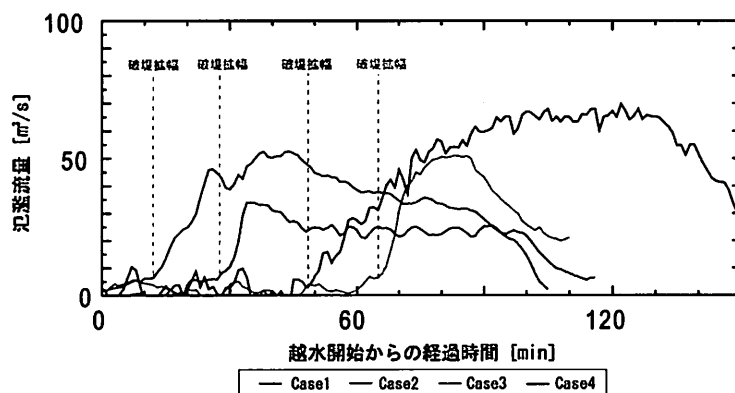


図-7 氾濫流量

### 3.2 流量観測結果

図-7に氾濫流量を示す。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<sup>16)</sup>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をしている。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。

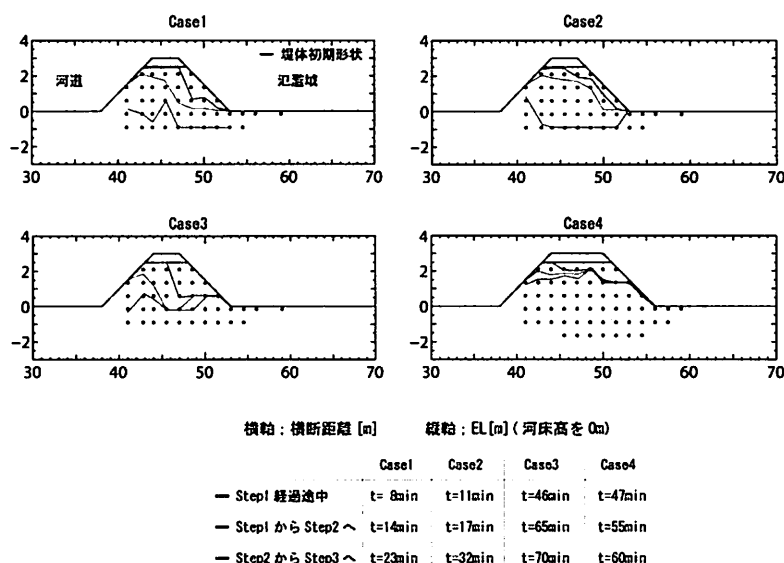


図-8 加速度センサーを用いた破堤進行過程の推定

### 3.3 破堤進行過程

図-8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、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えると考えられる。図-9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。

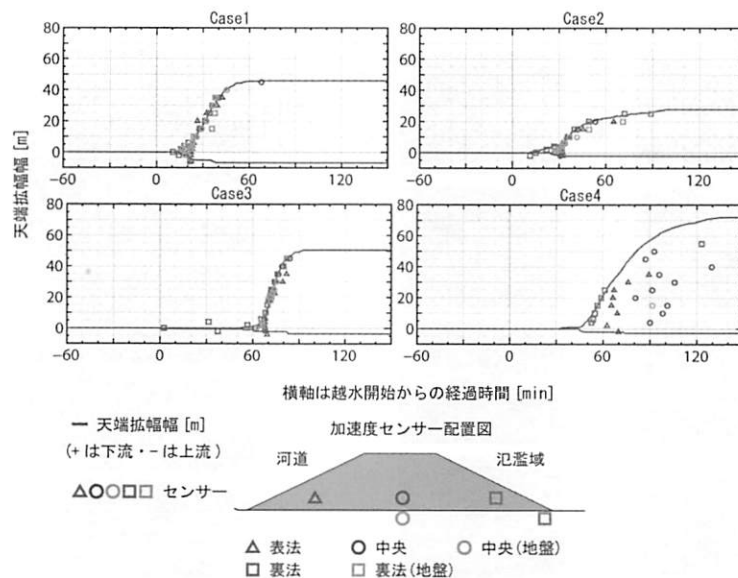


図-9 破堤拡幅進行過程

これより不可視部分である崩壊過程を推定する。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、裏法面や天端の浸食が先行し、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目だけでなく、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。

### 3.4 破堤進行のまとめ

ここでは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、前述までの分析より破堤進行過程を4つのステップに分類した。実験状況の時系列写真に各ステップを明示したものを図-10・図-11に、各ケースの観測データ時系列に各ステップを明示したものを図-12・図-13に示す。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。以下ではステップ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]

堤防表法肩まで侵食が到達し破堤拡幅が徐々に進行する。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、それ以外のケースでは上流からの流れ込みが大半を占めている。またCase4では天端幅が他ケースの倍と広く、河道から氾濫域までの堤体通過距離が長いため、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。

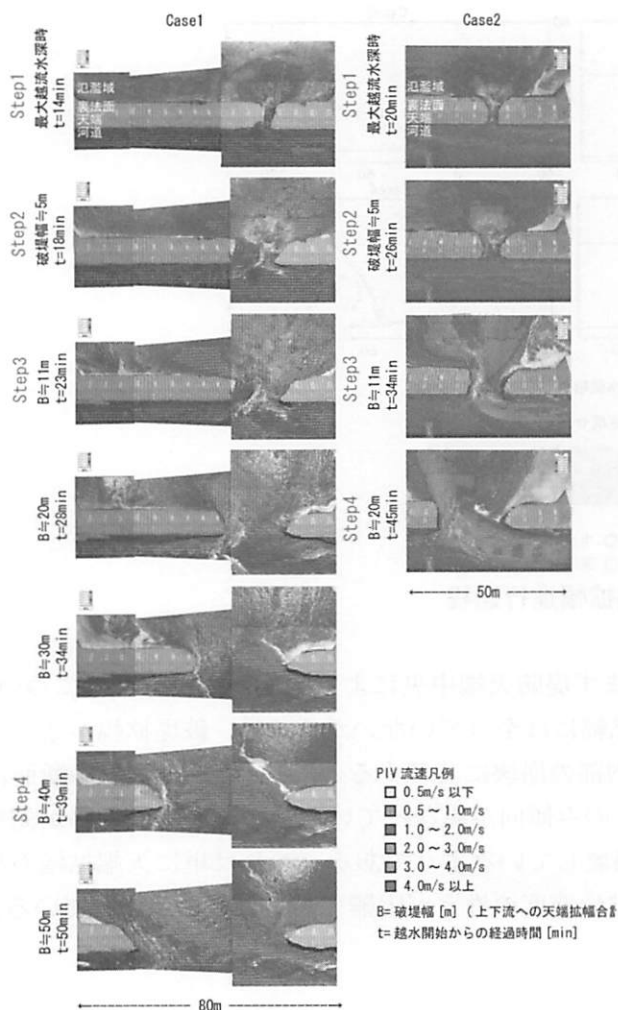


図-10 実験状況 (case1・2)

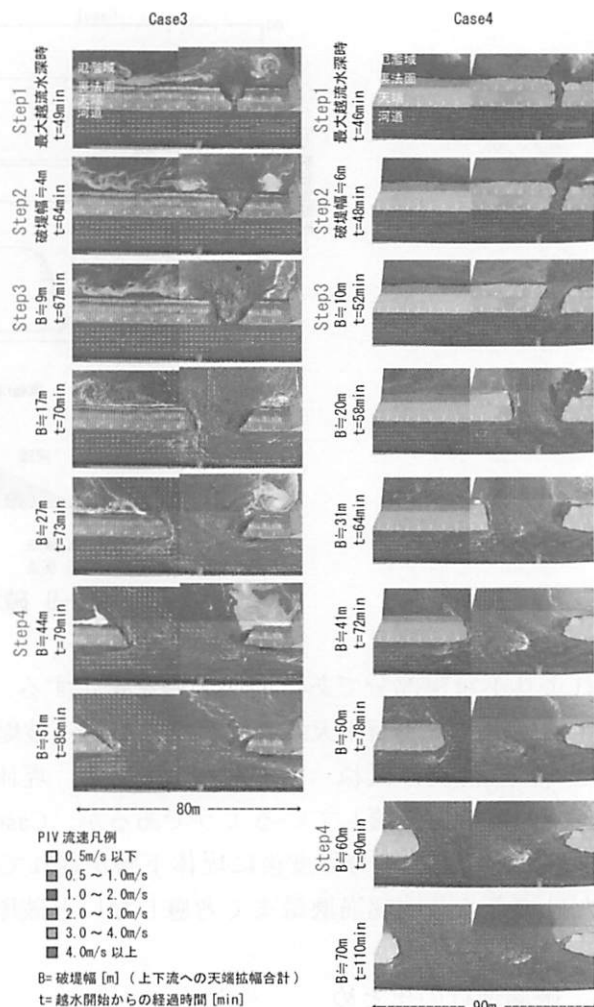


図-11 実験状況 (case3・4)

### [Step3；急激に破堤拡幅が進行]

破堤部の大半が崩壊した後、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。この時、河道と氾濫域の水位差は小さくなっている。

## 4. 破堤進行過程における考察

前述の通り、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-12・図-13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。

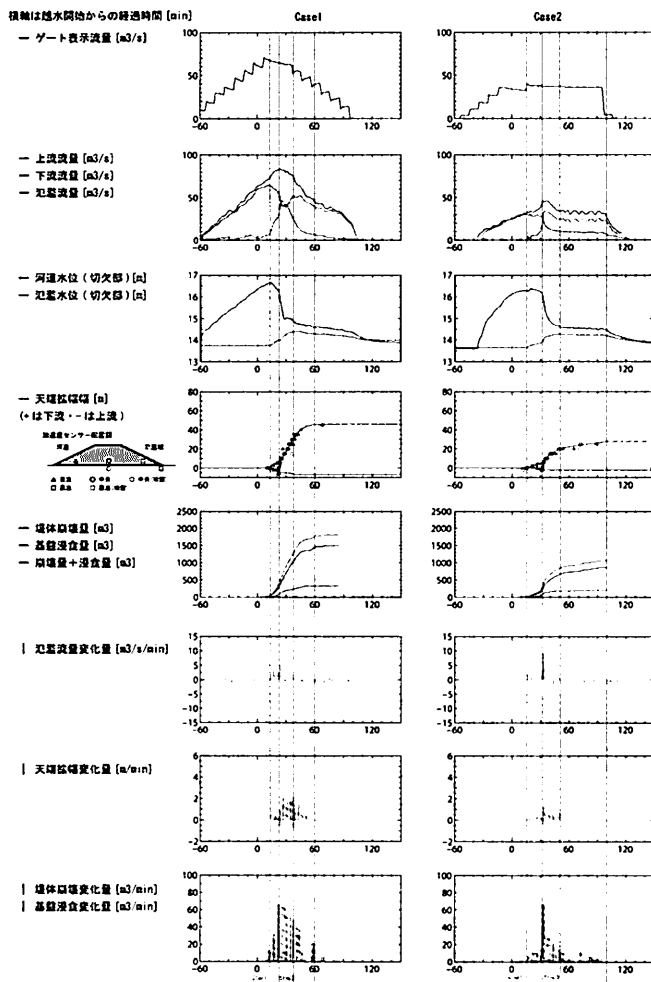


図-12 観測データ時系列 (case1・2)

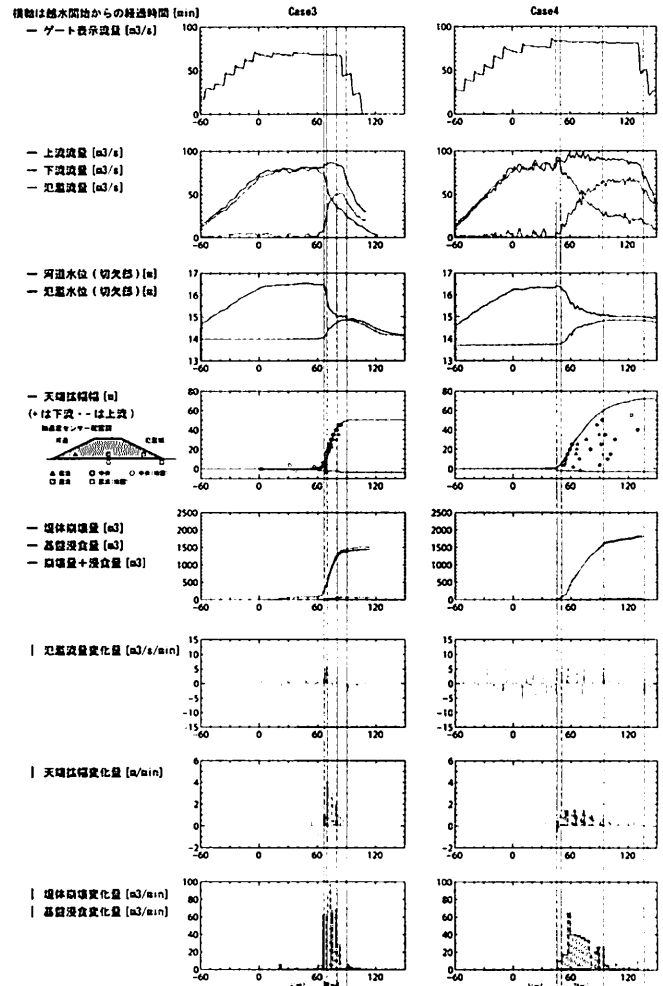


図-13 観測データ時系列 (case3・4)

#### 4.1 破堤拡幅開始までの考察

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と、本実験結果を比較する。報告書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-12・図-13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た。越流量は図-12・図-13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を用いて算出した。図-14

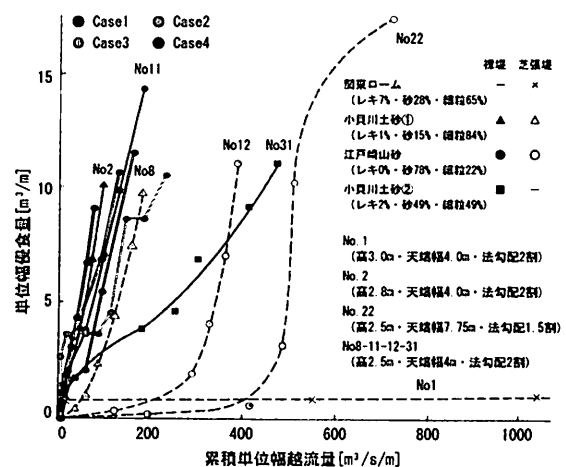


図-14 単位幅侵食量と累積単位幅越流量

は既往の結果に、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にもかかわらず、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も裸堤であるが侵食速度が遅いようである。これは報告書によると、

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と大きく異なる結果にはならなかったと言える。

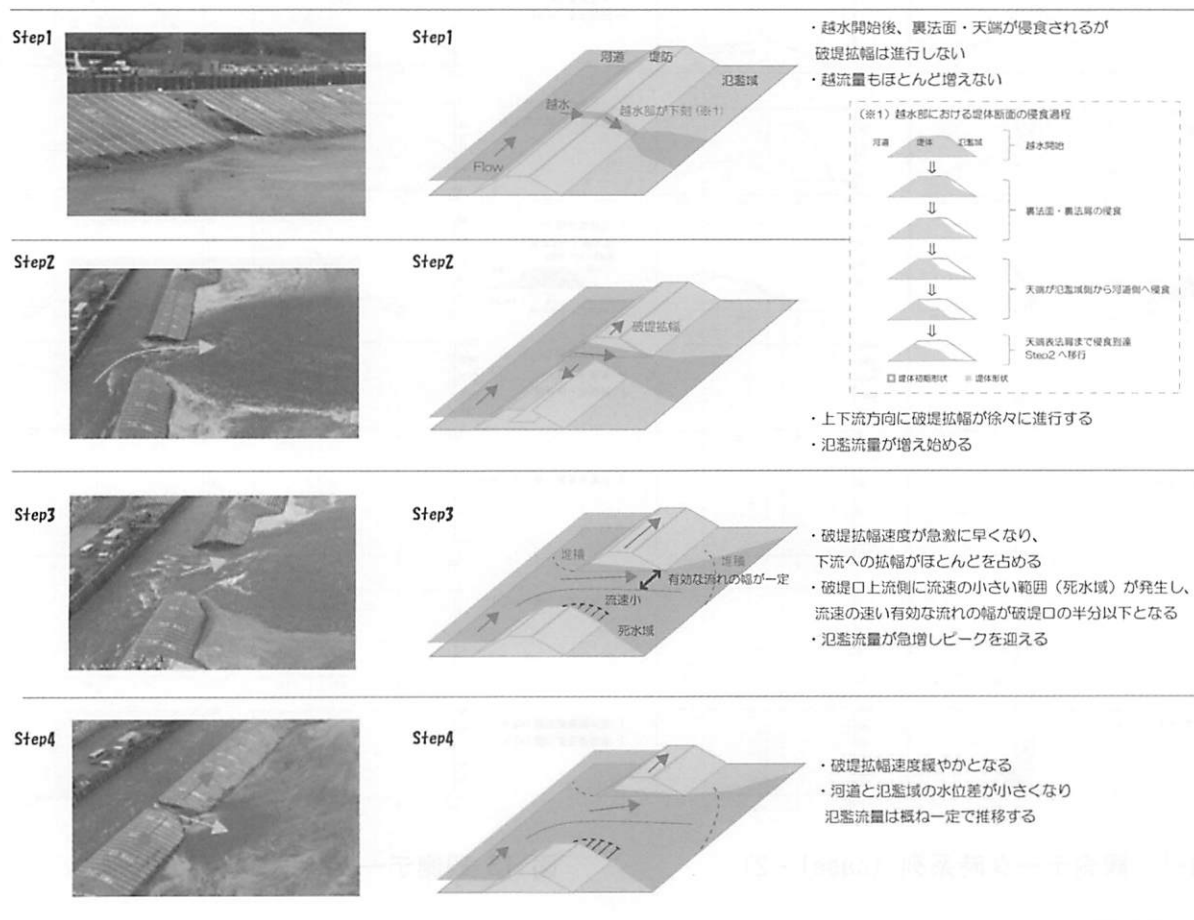


図-15 破堤進行過程概略図

#### 4.2 破堤幅拡幅開始以降の考察

実際に越水破堤が起こった場合、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非常に重要である。現在、ハザードマップ作製には氾濫シミュレーションマニュアル(案)など<sup>12) 13)</sup>が用いられているが、これによると最終破堤幅は合流点付近の場合は(1)式、合流点付近以外の場合は(2)式、急流河川の場合は(3)式で算定されるように河幅のみに依存している。

$$B = 2.0 * (\log_{10} X)^{3.8} + 77 \quad (1)$$

$$B = 1.6 * (\log_{10} X)^{3.8} + 62 \quad (2)$$

$$B = X \quad (3)$$

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。

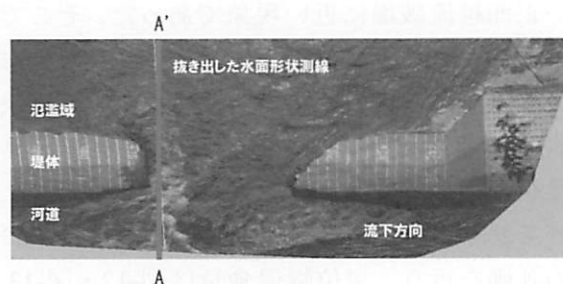


図-16 水理量の設定箇所(図は case1 の t=25min)

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。

#### 4.2.1 堤体崩壊量の算出

前述のとおり、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-12・図-13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。

#### 4.2.2 堤体周辺水理量の算出

破堤拡幅進行は前述のとおり、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-16 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ケースで数カットであるが、その結果を図-17 に示す。破堤拡幅進行は前述のとおり、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  $\tau_*$  を(4)式より算出した。

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

ここで、 $u_*$ ：摩擦速度、 $s$ ：砂粒の水中比重、 $g$ ：重力加速度、 $d$ ：粒、 $R$ ：径深（ここでは破堤開口部水深  $h$ ）、 $i_e$ ：エネルギー勾配を示す。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。

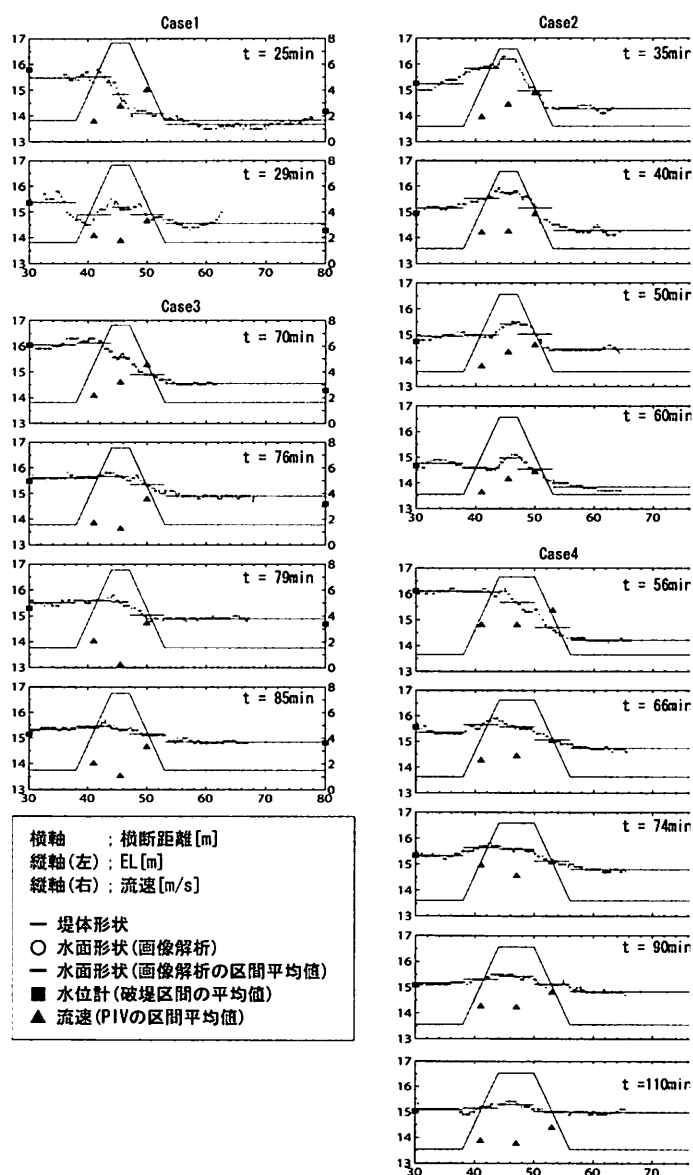


図-17 開口部下流端近傍の水面形状と流速

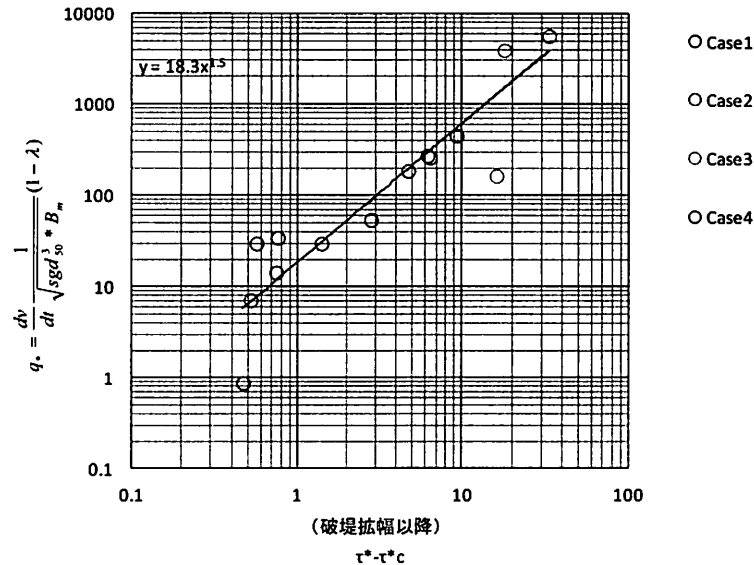


図-18 堤体崩壊量と堤体に作用する無次元掃流力

#### 4.2.3 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力  $\tau_*$  の関係を既往の掃流砂量式や泉らの手法を参考に(5)式のように整理を行った。

$$q_* = \frac{dV}{dt} \frac{1}{\left( \sqrt{sgd_{50}^3} \cdot B_m \right)} (1 - \lambda) \quad (5)$$

ここで  $\lambda$  : 空隙率,  $B_m$  : 堤体下幅,  $\tau_*^c$  : 無次元限界掃流力,  $\alpha_* \cdot \beta_*$  : 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、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、前述のとおり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。(5)式を用いて実験結果をプロットしたものが図-18 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傾向を示している。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。

#### 5.まとめ

以下に今回、得られた知見を簡潔に示す。

- ①破堤進行過程を 4 ステップに分類して、各ステップの破堤機構について整理した。
- ②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、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と比較したところ、千代田実験水路内という非常に限られた条件下であるものの、破堤初期段階については、正面越流実験と大きく異なる結果にはなかった。
- ③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、またその式形は掃流砂量式に近いものであった。

謝辞：十勝川千代田実験水路での実験実施にあたっては十勝川千代田実験検討会から助言を多く頂いた。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) IPCC第4次評価報告書統合報告書政策決定者向け要約(仮訳)，文部科学省・気象庁・環境省・経済産業省，2007.
- 2) 社会資本整備審議会：水災害分野における地球温暖化に伴う気候変化への適応策のあり方について(答申)，国土交通省，2008.
- 3) 吉川勝秀：河川堤防学，技報堂出版，pp.98，2008.
- 4) 今後の治水対策のあり方に関する有識者会議：今後の治水対策のあり方について 中間とりまとめ(修正案)，国土交通省，2010.
- 5) 耐越水堤防整備の技術的な実現性検討委員会：「耐越水堤防整備の技術的な実現性の見解」について，社団法人土木学会，2008.
- 6) 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.
- 7) 島田友典ほか：十勝川千代田実験水路の基礎的な土砂挙動特性，土木学会応用力学論文集，Vol.11，pp.699-707，2008.
- 8) 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.
- 9) 島田友典・横山洋・平井康幸・三宅洋：千代田実験水路における氾濫域を含む越水破堤実験，土木学会水工学論文集，第55巻，pp.841-846，2011.
- 10) 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.
- 11) 伊藤幸義・島田友典・横山洋・坂野章・茂木映治：模型実験による氾濫域を含む越流破堤メカニズム検討，土木学会河川技術論文集，第16巻，pp.371-376，2010.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 十勝川水系河川整備計画，国土交通省北海道開発局帯広開発建設部，  
<http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/kakusyu/houshin-seibi/index.html>，2010.
- 15) 水理公式集(平成11年度版)，土木学会，pp.132-133，1999.
- 16) 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.