

# 千代田実験水路における 越水破堤拡幅メカニズム検討

寒地土木研究所 寒地河川チーム 島田 友典  
寒地土木研究所 寒地河川チーム 柿沼 孝治  
北海道開発局 帯広開発建設部 治水課 三宅 洋

越水破堤に関する研究は実スケールでの3次元破堤(横越流)メカニズムが未解明である。これを明らかにすることは防災上、また今後の破堤に関する研究発展のためにも非常に重要である。この課題を明らかにすることを目的には十勝川千代田実験水路の背割堤を用いて河川流れを考慮した横越流の越水破堤実験を行った。本論文では実験結果を整理し、越水から破堤拡幅進行過程を通常は不可視部分である堤体内部の崩壊過程も含めて明らかにした。更に破堤拡幅速度に寄与する因子について検討を行った。

キーワード：越水破堤，破堤拡幅過程，十勝川千代田実験水路

## 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レビューを行っている<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、3次元越水破堤メカニズムについて未解明な部分が多い。よって破堤現象を時系列で把握し、さらには水中などの不可視部分である堤体内部の崩壊過程まで含めて、データの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、ハザードマップの精度向上や破堤後における堤防復旧等の危機管理対策技術の向上など、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>。

特に2010年度からは図-1に示すようにより実現象に近い氾濫域まで考慮し、河道流れがある横越流による越水破堤実験を実施している<sup>9)</sup>。

本論文では2ヶ年分(2010・2011年度)の実験結果を用いて、通常は不可視部分である水面下も含めた堤体内部の崩壊過程・破堤拡幅進行過程を明らか



図-1 千代田実験水路内における越水破堤実験の様子

にした。また破堤拡幅速度を推定することを目的に、堤体崩壊量と破堤開口部周辺の水量について検討を行った。

## 2. 越水破堤実験の概要

### (1) 実験条件と実験実施概要

図-2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-3に堤体の土質試験結果を示す。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。

図-4に実験水路形状を示す。実験スケジュールは2010年に上流区間でCase1、下流区間でCase2を実施した。実験後に再度、同箇所にも築堤を行い2011年に上流区間でCase3、下流区間でCase4を実施

	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 <sup>3</sup> /s	砂礫	3m	3m	1:02	2010年	4月
Case2	35m <sup>3</sup> /s						8月
Case3	70m <sup>3</sup> /s	細粒分	6m			2011年	4月
Case4		砂礫					6月

図-2 実験条件

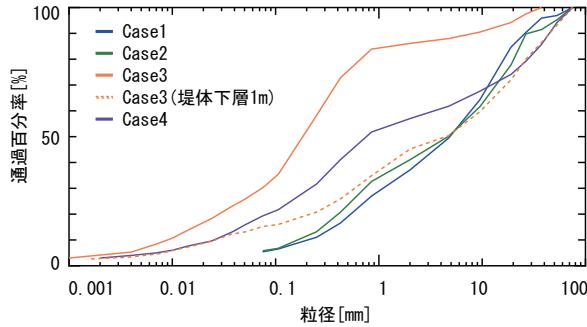


図-3 堤体材料の粒度分布

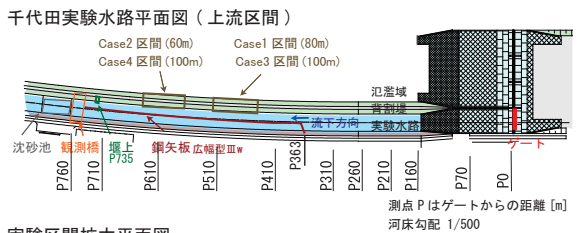


図-4 実験水路概要

した。

### (2) 観測概要

主な観測項目・観測箇所は図-5 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り、詳細は既報<sup>9)</sup>を参照してもらいたい。

### (3) 通水概要

通水は切欠からの越流水深が概ね 30cm(過去の事例<sup>10)</sup>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-6 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。

### 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	矢板区間を中心に 25m ビッチ (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) (杭ワイヤー式 ADCP・電波式流速計)
	流況観測	縦断方向は実験区間・横断方向は矢板から 40m 程度 (PIV)
破堤形状 実験状況	破堤形状	加速度センサー・色砂法
	実験状況	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-5 観測項目概要

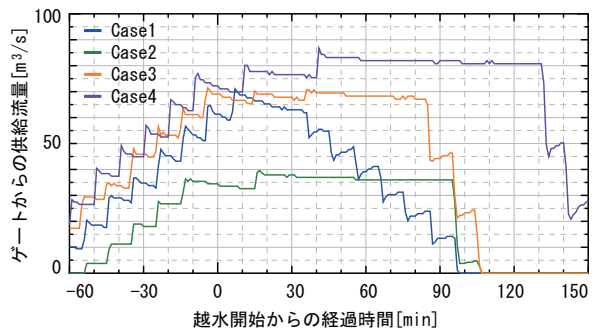


図-6 ゲートからの供給流量

## 3. 越水破堤実験の結果

### (1) 実験概況

図-7 に上空より撮影した実験状況のうち、代表的な破堤幅毎(切欠部より下流)の結果を示す。図-8 に各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を示す。図-9 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<sup>11)</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。

以下に代表的な破堤幅毎の概況を示す。

[破堤幅 5m 程度] 全ケースとも河道内の流れに大きな影響を与えることなく、破堤部の周辺から開口部に向かう流れが見られる程度である。なお水面勾配が緩い Case2 では開口部の上下流から流れ込んでいるが、それ以外では上流からの流れ込みがほとんどを占めている。Case4 では天端幅が広く河道から氾濫域までの堤防通過距離が長いので、開口部の下流端にぶつかった流れが上流に向くことで、開口部自体も上流に向いている。河道内の水位低下は少なく、また氾濫流量もほとんど増加していない。

[破堤幅 10m 程度] 河道幅全体から破堤開口部に向かう流れが向かっており、これ以降、破堤拡幅が急激に下流へ進行している。また Case1・2 では河道内の

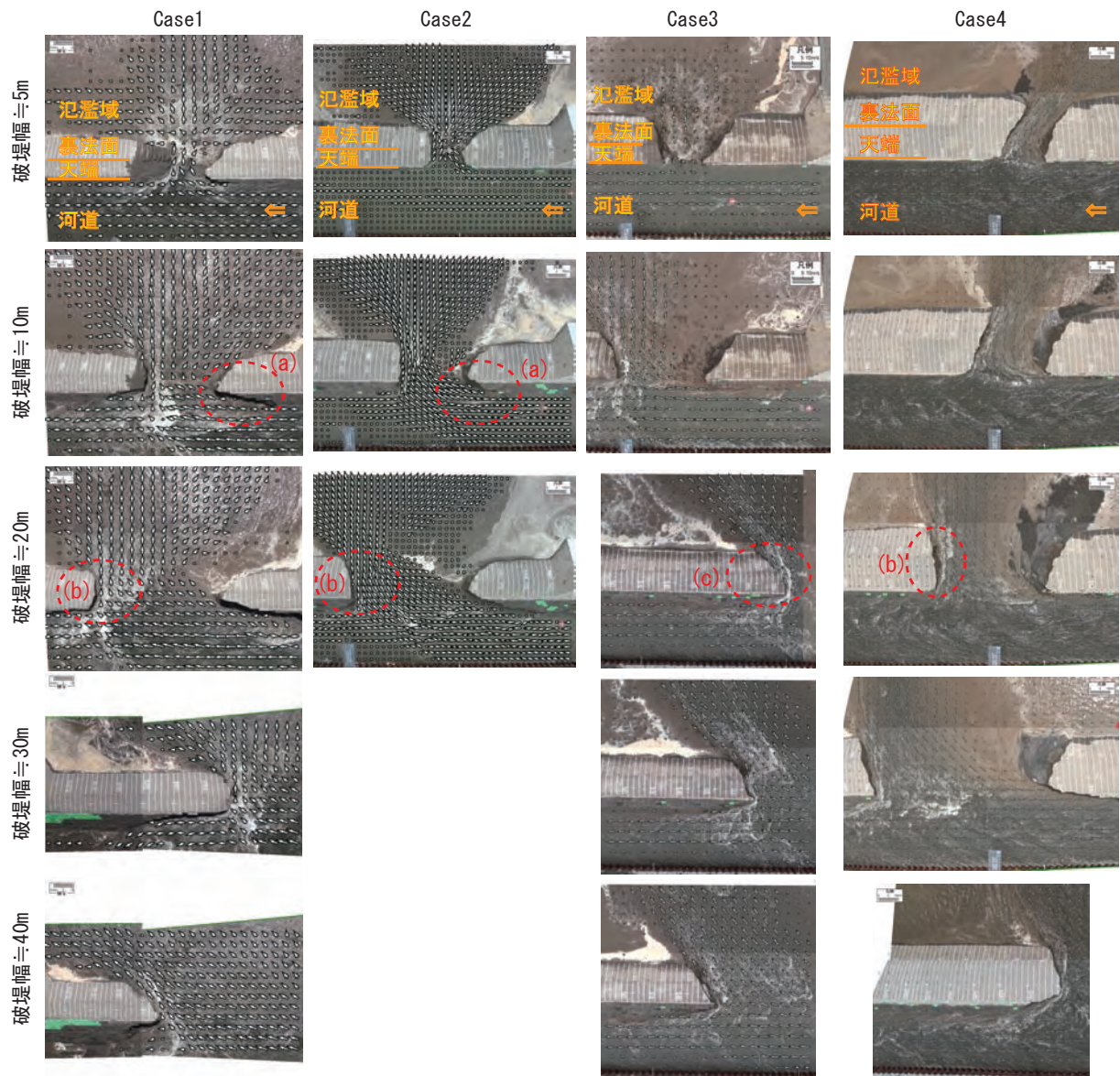


図-7 実験状況

水位の急激な低下が見られ、氾濫流量も急増している。開口部に向かった水位低下により、河道表面面の浸食 (a) も見られ、それも破堤拡幅を助長しているようである。

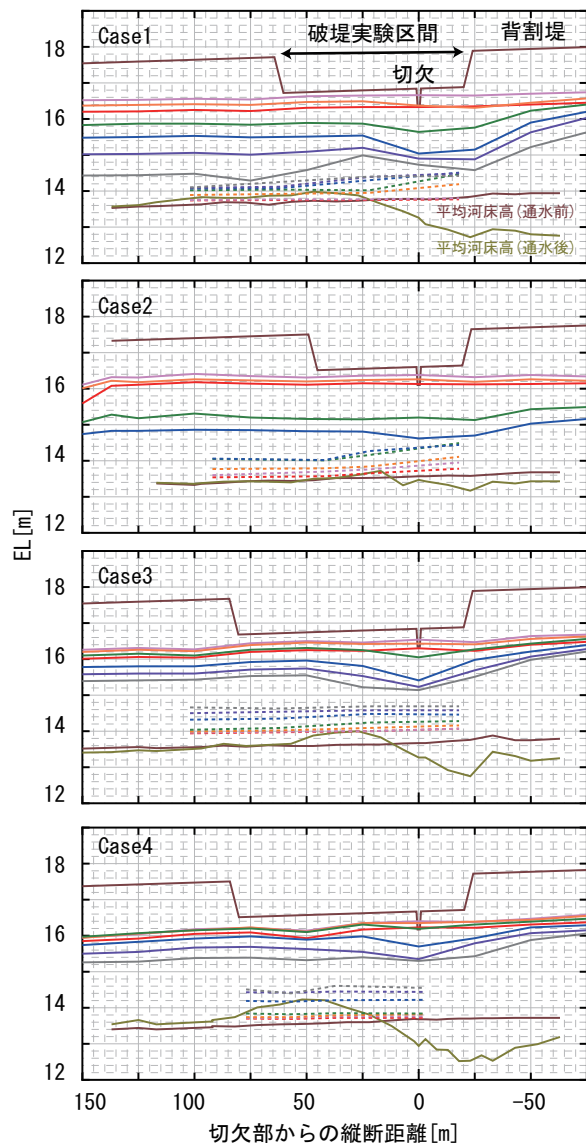
一方で Case3・4 では若干の水位低下と氾濫流量が徐々に増加を始めた程度である。Case1・2 に対し堤体土質・堤体形状が異なっており、この相違が同じ天端の破堤幅 10m であっても氾濫流量の増え方に相違があったと考えられる。

[破堤幅 20m 程度] 破堤開口部の下流端形状が Case1・2・4 では概ね河道流れに対して直角 (b) であるのに対し、Case3 では河道から氾濫域に向かって裏法側が削れた斜め形状 (c) となって破堤が進行している。Case3 では堤体下層の 1m が砂礫であり、上層の細粒分の含まれた箇所と比較してそこが弱部となり、流れのあたる裏法が先行して崩壊していた可能性がある。

[破堤幅 30m 以降] 全ケースにおいて、河道から氾濫域に裏法側が削れた斜め形状となり破堤拡幅が進行している。Case3 ではこの段階で氾濫流量がピークを迎えており、Case4 は氾濫流量が増加中である。なお破堤幅 40m の時間において Case1・3・4 はいずれも氾濫流量が  $50\text{m}^3/\text{s}$  程度であった。流況は表法周辺で分岐し、河道へ向かう流れと氾濫域にむかう流れが見られ、その流速は裏法に向かって加速しているようである。

## (2) 破堤幅拡幅進行過程

図-10 にビデオより判読した堤防天端中央の破堤拡幅進行過程を示す。また不可視部分である堤体下層 (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。これより天端破堤幅が同じであっても堤体下層も同様に崩壊しているのか否かなど、同じ断面であってもどういった過程で崩壊し、破堤が



	Case1	Case2	Case3	Case4
越水開始時	0[min]	0[min]	0[min]	0[min]
最大水位時(切欠部)	14[min]	20[min]	50[min]	47[min]
破堤幅≒5m時	20[min]	29[min]	67[min]	50[min]
破堤幅≒10m時	25[min]	36[min]	69[min]	53[min]
破堤幅≒20m時	31[min]	50[min]	72[min]	59[min]
破堤幅≒30m時	37[min]		75[min]	65[min]
破堤幅≒40m時	45[min]		78[min]	73[min]

実線は河道左岸水位、波線は氾濫域水位(水路左岸鋼矢板から50m離れ)を示す

図-8 水位縦断図

進行したかが把握可能となる。

まず堤防天端中央による破堤拡幅進行過程について、Case1・2は既報<sup>9)</sup>のように、越水開始後も破堤拡幅を伴わないStep1、徐々に拡幅するStep2、急激に進行するStep3、徐々に速度が低下するStep4、拡幅が停止するStep5といったプロセスを経るが、Case3・Case4についてはStep2がなく、いきなりStep3へと移行している。これは堤防の造成からの築年数の差によるものとも考えられるが、現時点では推測の域を出ない。

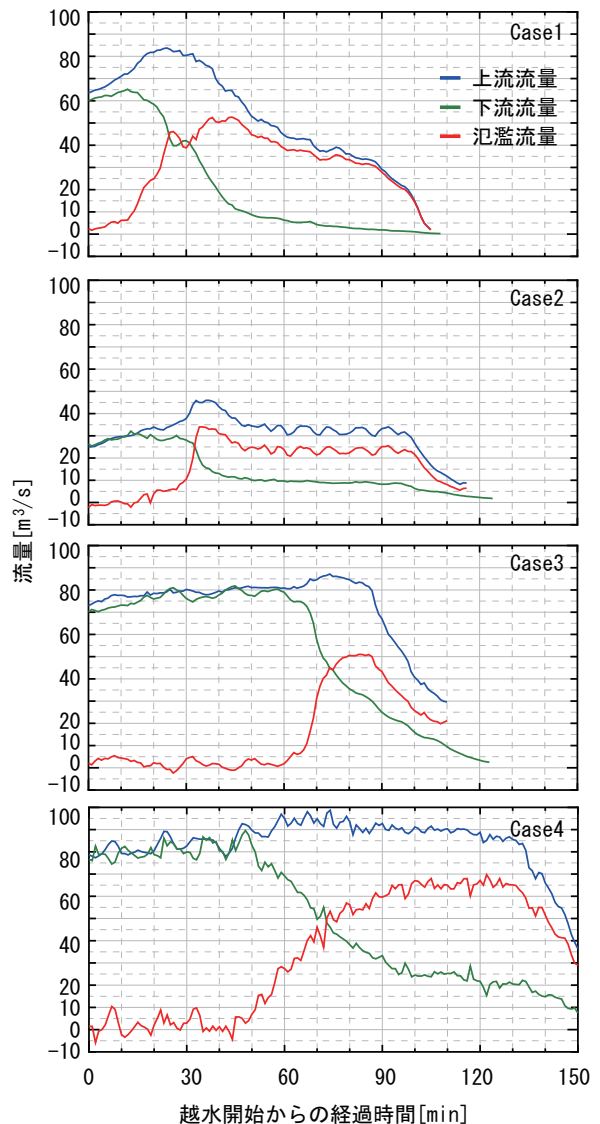


図-9 破堤区間上下流流量・氾濫流量

次に堤体下層の不可視部分も含めた破堤過程について、まずCase1は破堤幅10mから20m程度まで(a)は概ね全断面が同一時刻に崩壊し破堤進行している。破堤幅20mから30mにかけて(b)は表法-堤防天端-裏法といった順に崩壊し、破堤幅30m以降(c)では先ほどとは逆に裏法-堤防天端-表法といった順に崩壊している。

Case2は常時、裏法が先行、もしくは裏法と天端中央部が同時に崩壊し、それに遅れる形で表法が崩壊し破堤拡幅が進行している。

Case3はCase2と同様のプロセスを経て破堤拡幅が進行している。前述のように流れの当る堤体下層の砂礫が弱部となっている可能性がある。

Case4は最も特徴的であり、動画より判読した堤体天端の拡幅より30分から40分程度ほど遅れて崩壊進行しているようである。これは破堤拡幅速度の推定にあたり、単に天端の破堤幅のみでは実現象を十分に再現していると言えない。

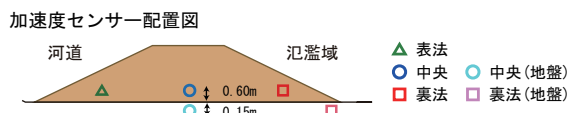
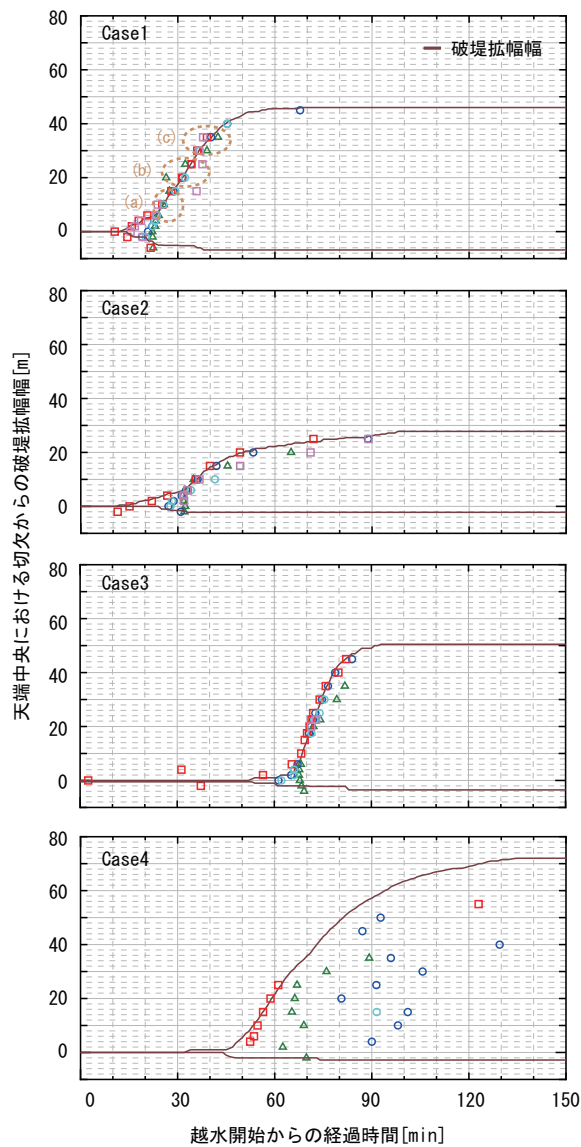


図-10 破堤拡幅進行過程

#### 4. 破堤拡幅速度の推定

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。ハザードマップ作製には現在、氾濫シミュレーションマニュアル(案)など<sup>13)14)</sup>が用いられているが、これによると最終破堤幅は河幅のみに依存し、破堤時間は越水から1時間となっている。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はおらず、破堤拡幅速度と何らかの水理量と関連づけることは重要である。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を用いて破堤拡幅速度の検討を行った。

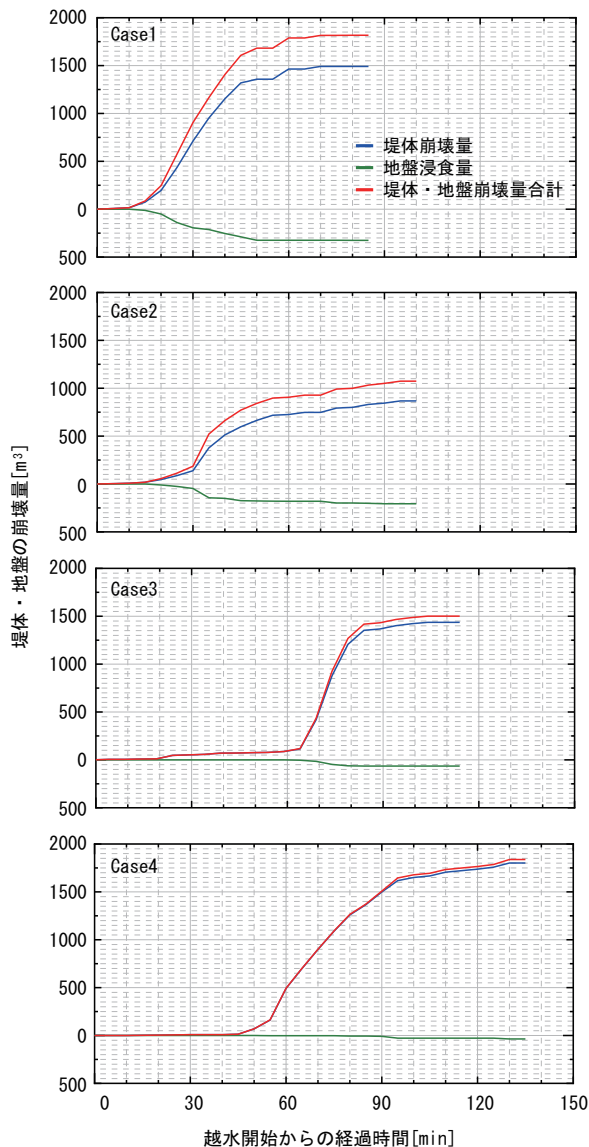


図-11 堤体崩壊量・地盤浸食量

#### (1) 堤体崩壊量の算出

前述のように堤防天端の破堤幅のみから破堤拡幅速度を推定することは困難である。ここで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-11に示す。これより単位時間あたりの崩壊量  $dV/dt$  を算出し、この崩壊量が推定出来ることで破堤拡幅の算出が可能になる。

#### (2) 堤体に作用する水理量の算出

図-7に示したように、破堤拡幅は開口部下流端に流れがぶつかることで進行し、特に裏法面近傍へ流れが集中しているようである。ここでは氾濫域で計測した水位等を用いて(1)式より堤体開口部に作用する無次元掃流量力  $\tau_*$  を算出した。

$$\tau_* = \frac{ghI_w}{sgd_{50}} \quad (1)$$

ここで  $g$ :重量加速度,  $h$ :氾濫域水深,  $I_w$ :堤内外の

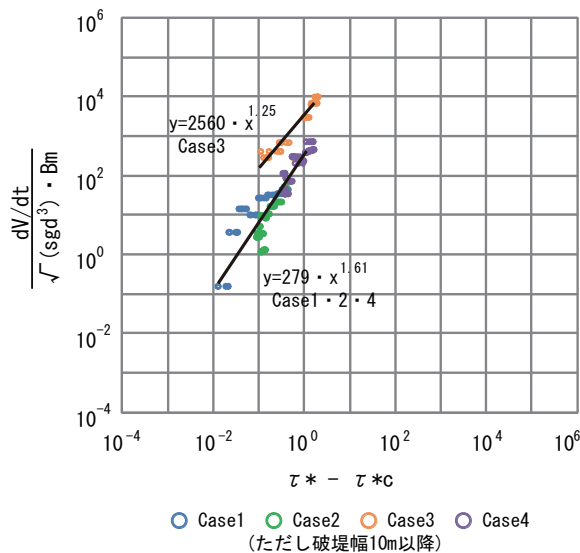


図-12 崩壊量と掃流力

水面勾配,  $s$ : 砂粒の水中比重,  $d_{50}$ : 粒径を示す.

### (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  $\tau_*$  の関係を掃流砂量式を参考に(2)式のように整理を行った.

$$q_* = \frac{dV/dt}{\sqrt{sgd_{50}^3 \cdot B_m}} = \alpha_* (\tau_* - \tau_{*c})^{\beta_*} \quad (2)$$

ここで  $B_m$ : 堤体下幅,  $\tau_{*c}$ : 無次元限界掃流力,  $\alpha_*$ :  $\beta_*$ : 係数を示す.

(2)式を用いて実験結果をプロットしたものが図-12である.これより基本のCase1に対し,河道内流況を変えたCase2,堤体形状を変えたCase4は概ね同様の結果を示しており,堤体土質を変えたCase4のみ異なった傾向となっている.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量より堤体崩壊量の推定が可能であり,また特に堤体土質によりその関係性に相違が出やすいと言える.

## 5. まとめ

今回の実験結果より,破堤開口部の無次元掃流力を用いることで破堤拡幅速度を推定出来る可能性を示した.また堤体材料によりその傾向が異なることが明らかとなった.

ただし今回はあくまでも十勝川千代田実験水路という限られた条件下での結果であるため,今後は実災害事例なども参考に一般化させていく必要がある.

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水路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) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.