

破堤氾濫流量の軽減技術に関する検討

-破堤開口部の締切に関する模型実験

-河道条件と破堤現象に関する模型実験および数値計算

国土交通省 北海道開発局
(国研)土木研究所 寒地土木研究所

-破堤開口部の締切に関する模型実験

1. 荒締切に関する現状と課題

1. 締切工の現状と課題（昨年度のADV委員会資料より）

【現状】

近年も全国の河川で破堤被害が生じているが、破堤時の緊急的な締切工事は事例が少なく、締切工の効果的な施工方法は確立されていない。

【課題】

災害時に破堤部周辺の流れを観測した事例は少なく、実際に生じた水理量に基づく詳細な検討が困難である。また最後の締切箇所である「せめ部」は、高流速や深掘れの発生により現場作業が困難であり作業手順などの確立が必要である。



決壊口の両側を石俵で補強
(S34伊勢湾台風)

昭55.7.20 決壊部の復旧作業



せめ部にH鋼
(S55淀川大堰緊急締切)



ブロック投入
(S61小貝川災害)



閉塞前の激しい流れ
(H14千代田新水路復旧)

2. 模型実験

2. 実験目的(昨年度のADV委員会資料に加筆修正)

実験の目的

荒締切により氾濫流量を軽減し、減災につなげるための基礎的な知見を得る

技術的課題

- ① 荒締切により破堤開口部が狭まるにつれて生じる現象の理解
- ② 効率的かつ効果的な荒締切の手順の検証

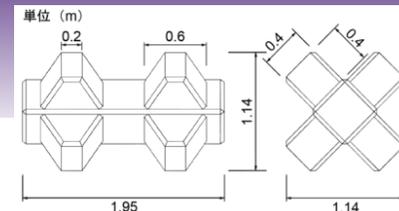
実験の内容

- ① 越水から破堤、破堤拡幅抑制、荒締切、せめ工までの一連で模型実験を行い現象を理解
- ② 荒締切を複数の方法（手順）で行い、締切作業効率・氾濫流量低減効果を検証

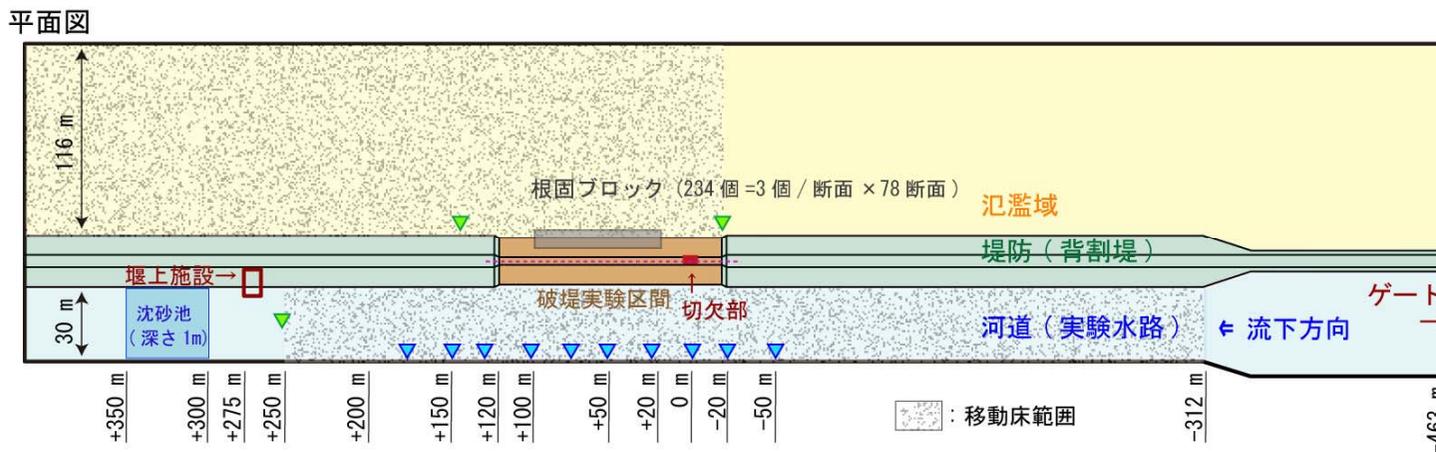
H28は荒締切方法を1ケース追加して実施

⇒H27は荒締切を進めるにつれ、開口部の河床低下が顕著となった
先行して開口部河床全体にブロックを投入し、
河床低下を抑制した上で荒締切を進める

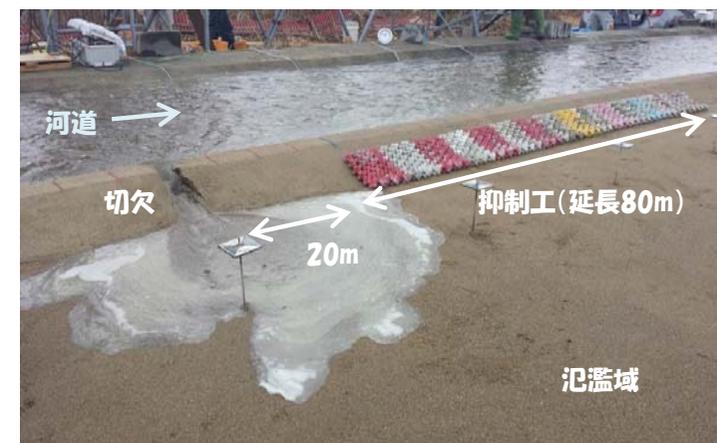
2. 実験概要



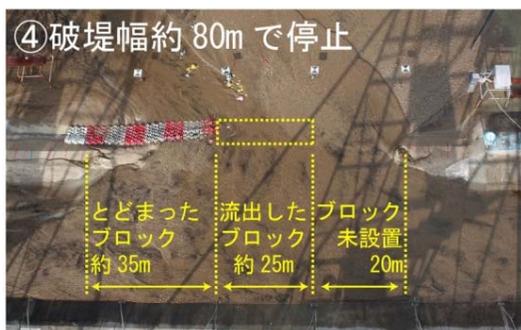
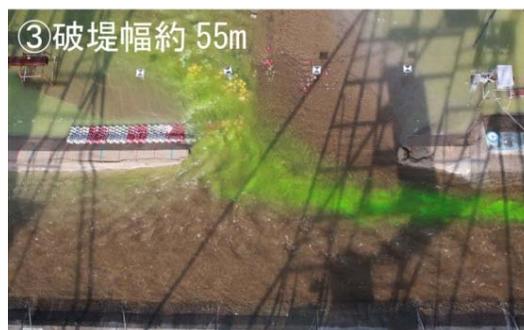
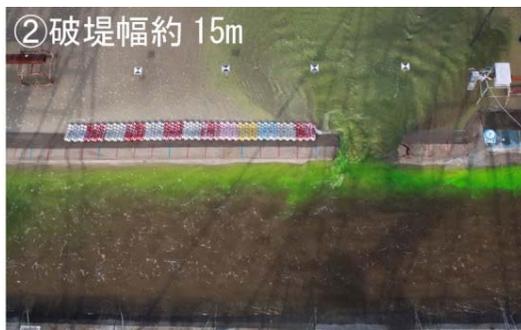
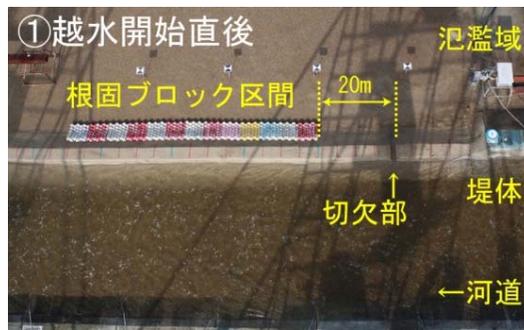
トラスフット2t型



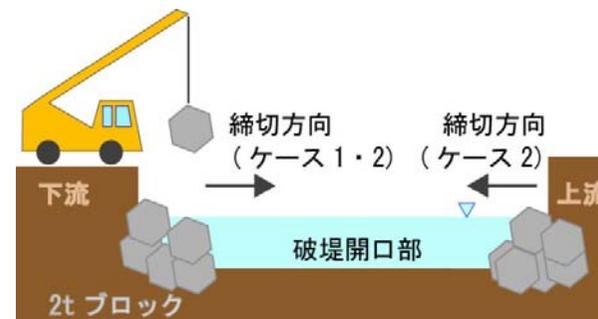
水路概要等



堤防からの越水

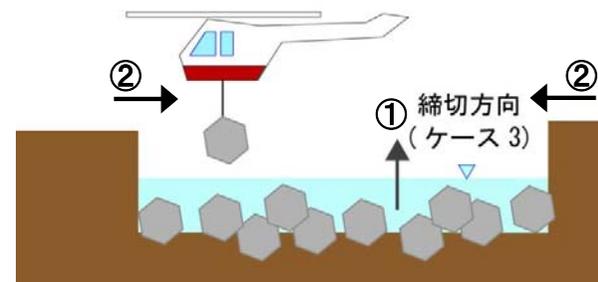


破堤拡幅抑制まで



ケース1：片側締切（下流から）
クレーンでブロックを1投ずつ投入
ダンプ・ブルで碎石間詰め

ケース2：両側締切（上下流から）
重機を上下流に配置
クレーンでブロックを2投ずつ投入
ダンプ・ブルで碎石間詰め



ケース3 (H28追加実験)
まず開口部全体に200個の
ブロックを投入
次にケース2のように開口
部上下流から締切を進める

荒締切ケースイメージ

2. 実験結果(ケース3の状況)

タワー上空より撮影

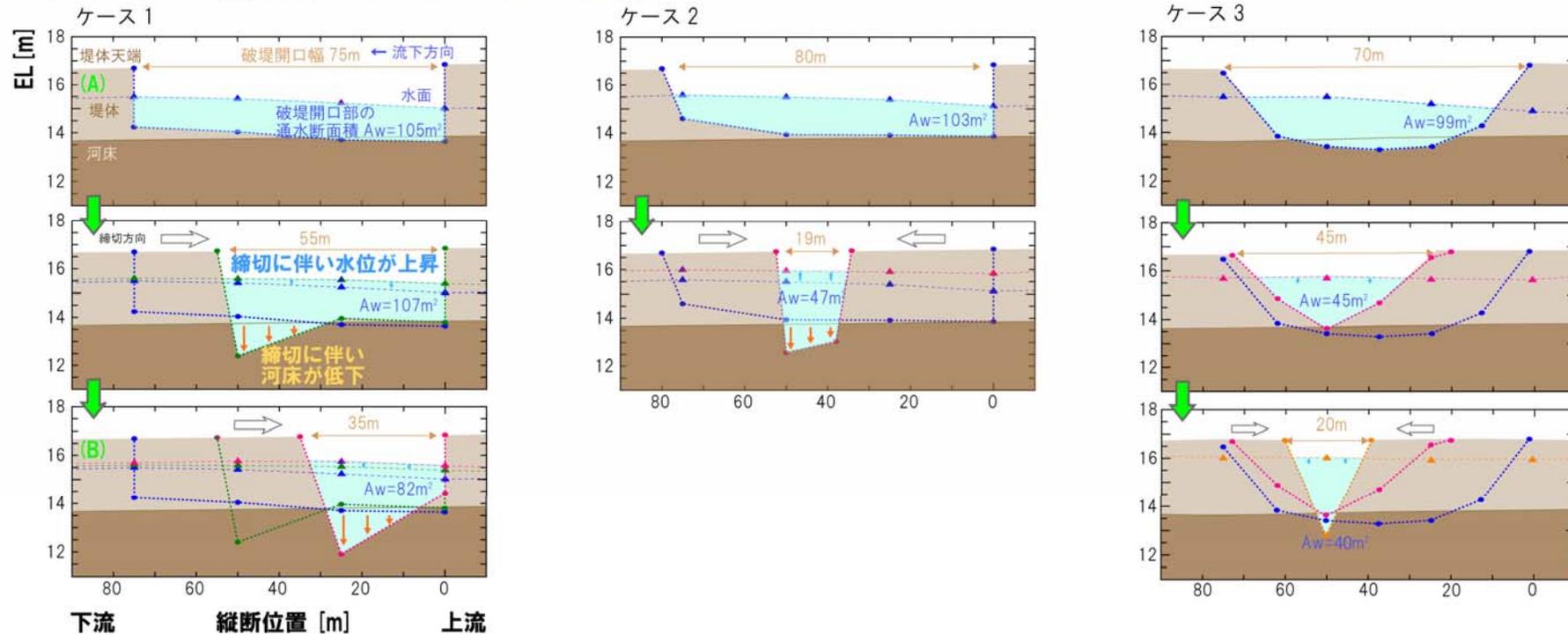
氾濫域上流より撮影

<p>開口幅≒70m</p> <p>氾濫域</p> <p>堤体</p> <p>←河道</p> <p>投入開始 7/13 15:15:00</p>	<p>開口幅≒20m</p> <p>920個投入</p> <p>4:18:46後(現地換算1157.2分後)7/14 15:03:00</p>
<p>開口幅≒70m</p> <p>200個投入</p> <p>ここまでが面的投入</p> <p>1:39:06後(現地換算443.2分後)7/13 16:21:20</p>	<p>開口幅≒10m</p> <p>1056個投入</p> <p>4:44:56後(現地換算1274.3分後)7/15 11:17:00</p>
<p>開口幅≒63m</p> <p>356個投入</p> <p>2:07:46後(現地換算571.4分後)7/13 17:33:00</p>	<p>開口幅≒63m</p> <p>1144個投入</p> <p>5:14:16後(現地換算1405.4分後)7/15 11:46:20</p>
<p>開口幅≒45m(確認)</p> <p>592個投入</p> <p>3:12:06後(現地換算859.1分後)7/14 11:35:20</p>	<p>通水後</p>

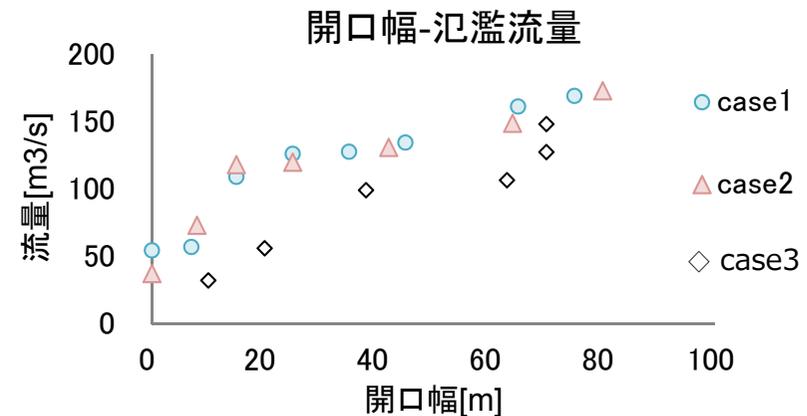
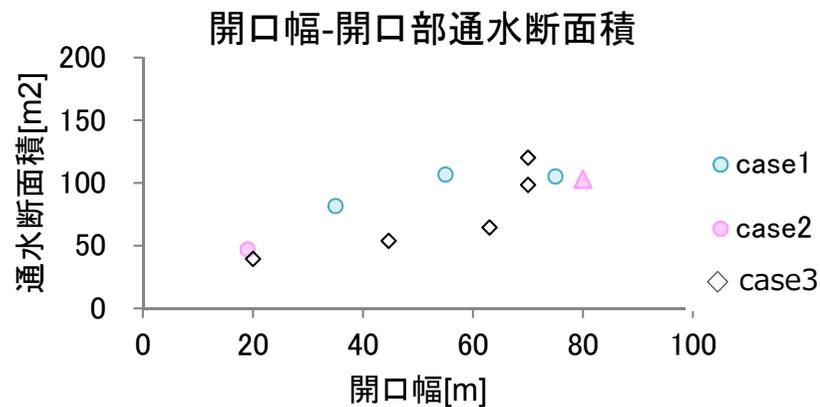
<p>河道</p> <p>堤体</p> <p>氾濫域</p> <p>投入開始 7/13 15:15:00</p>	<p>920個投入</p> <p>4:18:46後(現地換算1157.2分後)7/14 15:03:00</p>
<p>200個投入</p> <p>1:39:06後(現地換算443.2分後)7/13 16:21:20</p>	<p>1056個投入</p> <p>4:44:56後(現地換算1274.3分後)7/15 11:17:00</p>
<p>356個投入</p> <p>2:07:46後(現地換算571.4分後)7/13 17:33:00</p>	<p>1144個投入</p> <p>5:14:16後(現地換算1405.4分後)7/15 11:46:20</p>
<p>592個投入</p> <p>3:12:06後(現地換算859.1分後)7/14 11:35:20</p>	<p>通水後</p>

2. 実験結果(開口部形状)

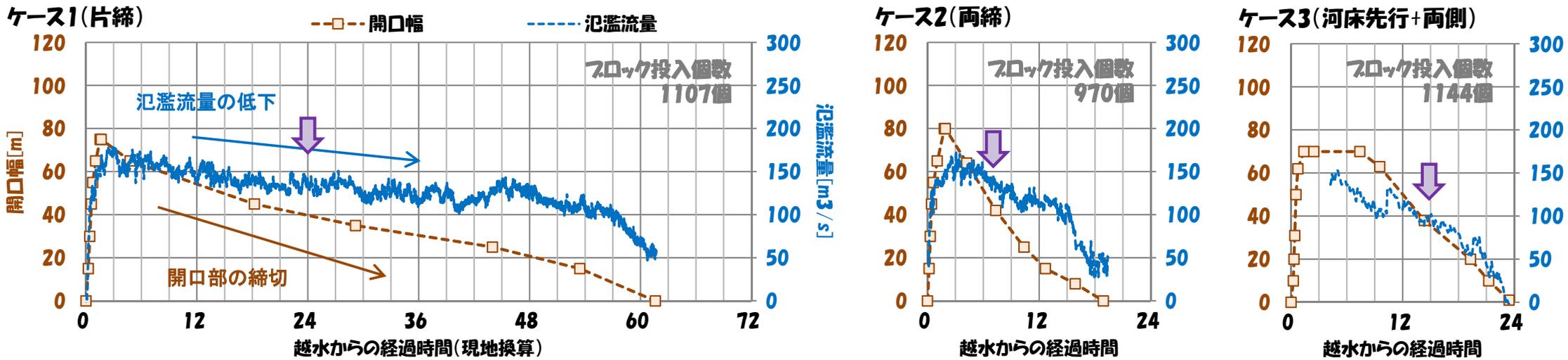
縮切に伴う破堤開口部の形状変化



事前に開口部全体にブロック投入することにより、開口部河床低下の抑制効果は見られた



2. 実験結果(開口幅と氾濫流量)



ケース1

半分程度締切ると氾濫流量は3割弱の低減
 所要時間は破堤開始から24時間程度
 投入は3分に1個×下流1箇所=1個/3分

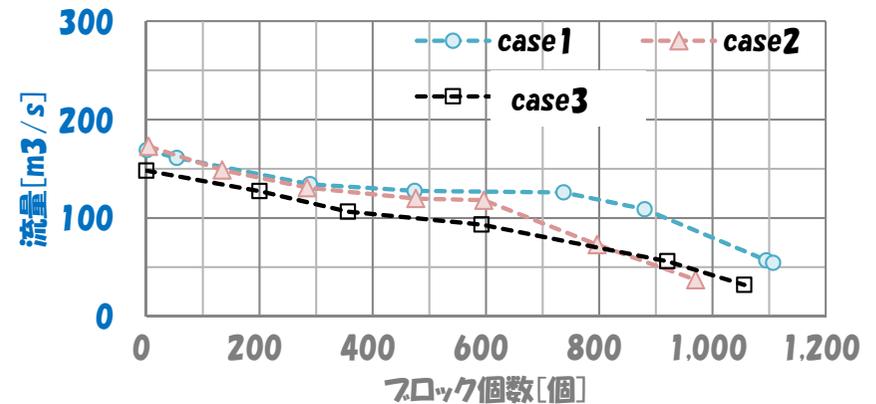
ケース2

半分程度締切ると氾濫流量は3割弱の低減
 所要時間は破堤開始から7時間程度
 投入は3分に2個×上下流2箇所=4個/3分

ケース3

開口部河床全体にブロックを敷設した上で、
 半分程度締切ると氾濫流量は3割強の低減
 所要時間は破堤開始から15時間程度
 投入は3分に1個×1箇所=1個/3分(200個まで)
 投入は3分に2個×上下流2箇所=4個/3分(201個以降)

フロック個数-氾濫流量



・投入開始時点の氾濫流量は異なるが、投入方法・位置などに関わらず、概ね投入個数に応じて氾濫流量低減

・ブロックの投入速度が氾濫流量軽減に直結

まとめ

- ・先行して開口部河床全面にブロックを投入することで開口部の河床低下は抑制
- ・しかしその他の手法と比較して、ブロック投入個数に応じた氾濫流量の低減には明確な差が生じなかった

- ・ブロック投入数に応じて氾濫流量が低減
- ・如何に早く効率的にブロックを投入できるかが重要

- ・これまで千代田実験水路を中心とした一定の河道条件で破堤現象の理解から、その対策に至る検討を実施

- ・河床勾配、川幅など河道の状況に応じた現象を理解することで、これまでの取り組みの適用性の検討などを行う必要がある。

-河道条件と破堤現象に関する模型実験および数値計算

資料概要

千代田実験水路を用いた実験より破堤現象のメカニズムの検討
実物大規模のメリットを活かし様々な知見を得てきている
(破堤進行過程、崩壊量と水理量、破堤数値計算モデル等)

現在は得られた知見をもとに減災工法について検討中
(H24より破堤拡幅抑制工、H27より破堤開口部締切工)

千代田現地実験は一定の河道条件

(川幅 $B=8\text{m}$ 、河床勾配 $lb=1/500$ 、通水流量 $Q_{in}=70\text{m}^3/\text{s}$)

今後、これまでに得られた知見を現場で活用するには、それらと
多様な条件の河道における現象との関係を整理・理解しておくこと
が重要



本資料では川幅と河床勾配の相違が破堤拡幅現象に与える影響
について整理を行ったものである

本資料の構成は以下に示すとおり

1. 実災害時の破堤形態事例 (P.14~)
2. 縮尺模型実験による検討 (P.17~)
3. 数値計算による検討 (P.25~)



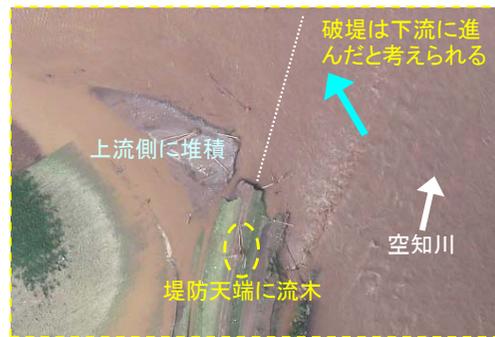
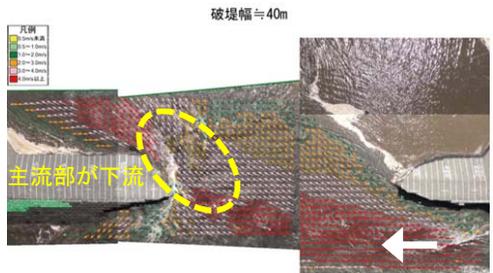
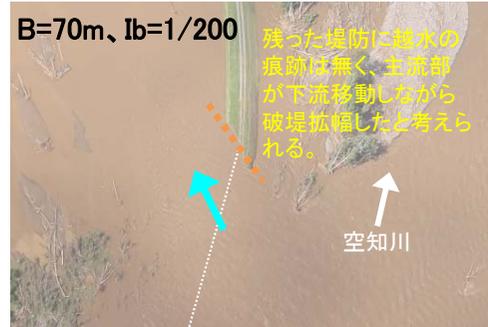
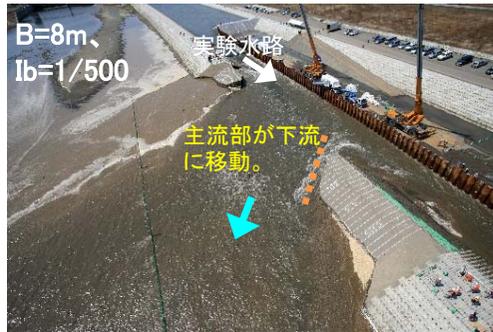
千代田実験水路での様々な実験

1. 実災害時の破堤形態事例

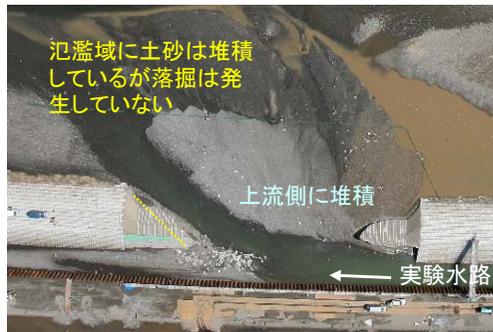
河道特性に応じた破堤現象の特徴一例①

急勾配河川の破堤事例(下流進捗)

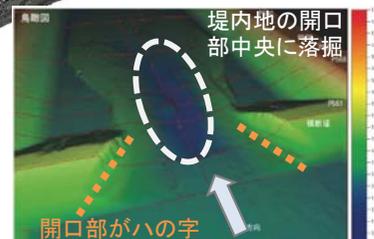
下流への拡幅進行が卓越、背割堤破堤実験に近い現象と推察



H28.8 空知川の堤防決壊
(上:破堤部下流側、下:破堤部上流側)



千代田実験水路での破堤実験(横断堤)
(上:通水時、右:通水後コンター図)

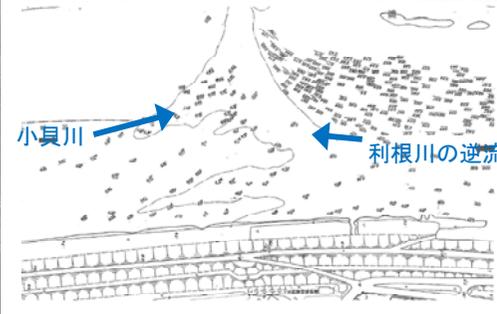
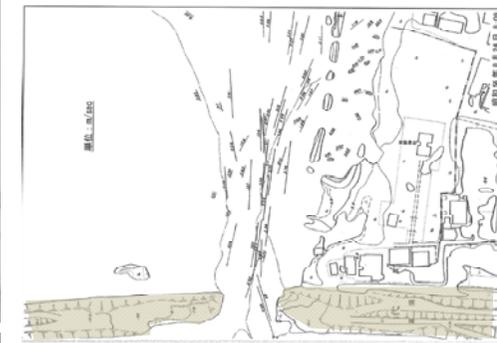


緩勾配河川の破堤事例(中央集中)

上下流から開口部に流れ、開口部中央に速い流れ



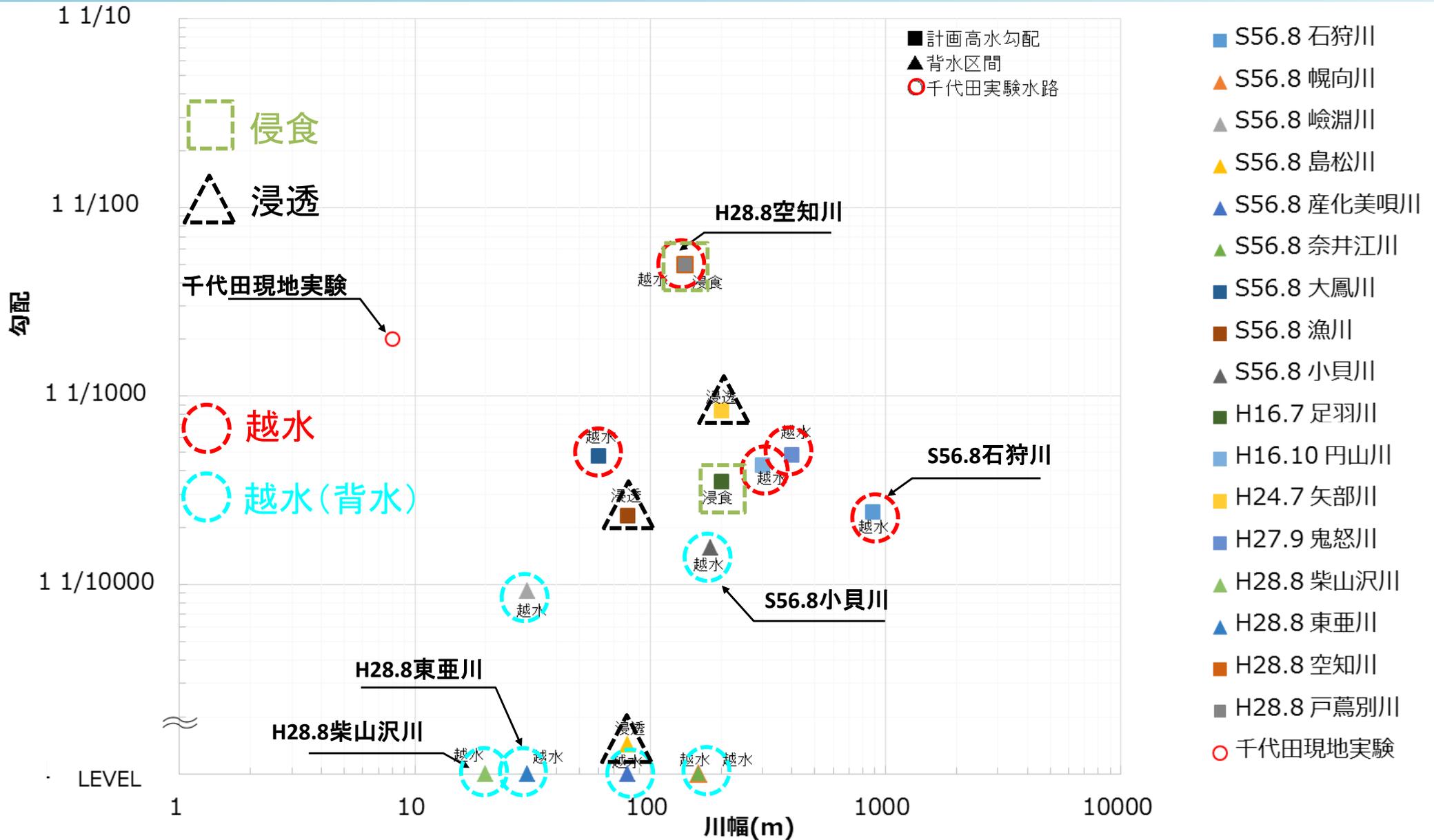
S56.8 石狩川の堤防決壊
(左:全体、右:下流側破堤部の拡大)



S56.8 小貝川の堤防決壊
(左上:堤防決壊時、左下:堤防復旧時、右:表面流況)

小貝川高須地先(I)-昭和56年台風15号出水による、災害復旧記録、社団法人関東建設弘済会、平成21年3月に一部加筆している

河道特性に応じた破堤現象の特徴整理③



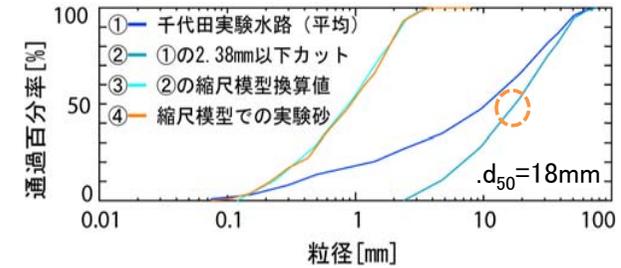
- ・千代田実験水路での破堤現象は水路幅が狭く勾配が急な条件
- ・破堤被害軽減技術の検討には、実河川を想定した河道形状での破堤現象把握が重要
(※勾配はHWL勾配)

2. 縮尺模型実験による検討

模型実験概要と実験ケース

【水路】

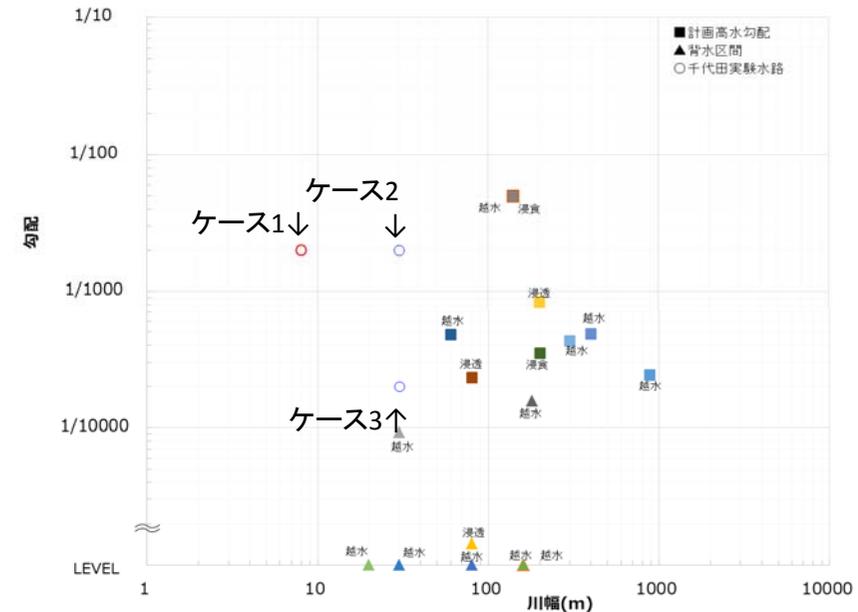
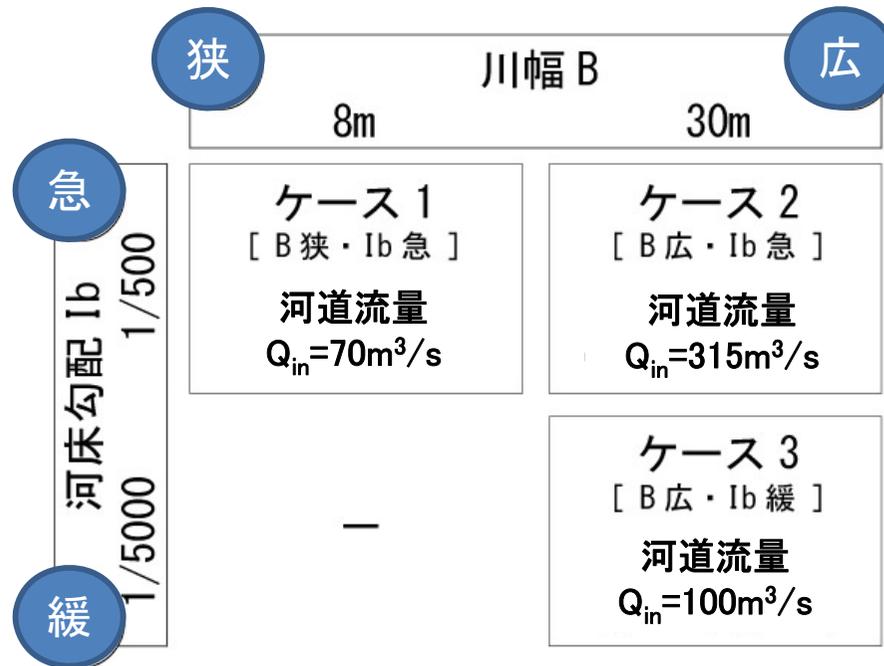
つくばにある千代田実験水路の縮尺模型実験水路を用いた実験(縮尺1/20)



【実験ケース】

BとIbを右の組み合わせで実験実施

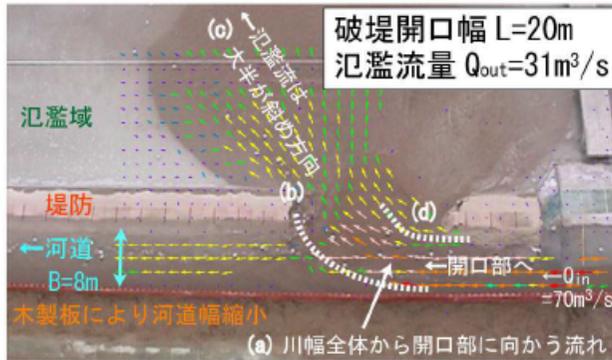
なおケース1は千代田現地の基本ケースと同じ



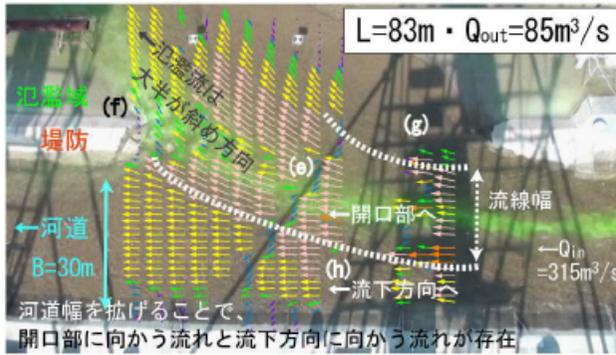
模型実験結果(流況・通水後形状)

ケース 1 (B=8m・Ib=1/500)

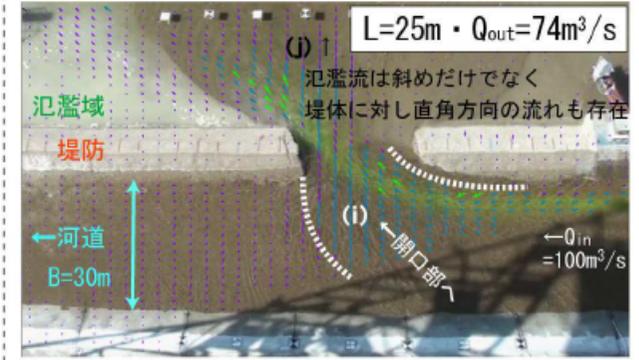
通水中 (PIV 流況)



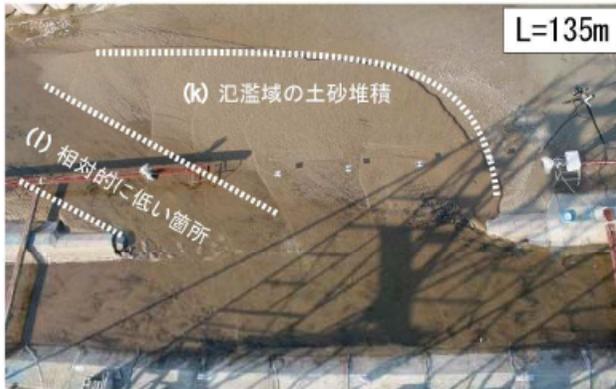
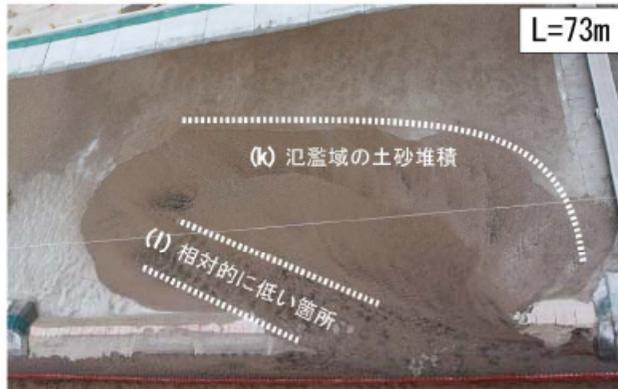
ケース 2 (B=30m・Ib=1/500)



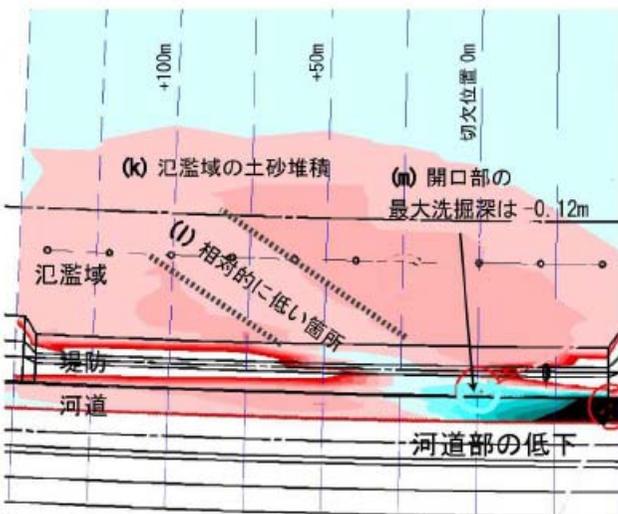
ケース 3 (B=30m・Ib=1/5000)



通水後



通水後 (コンター図)



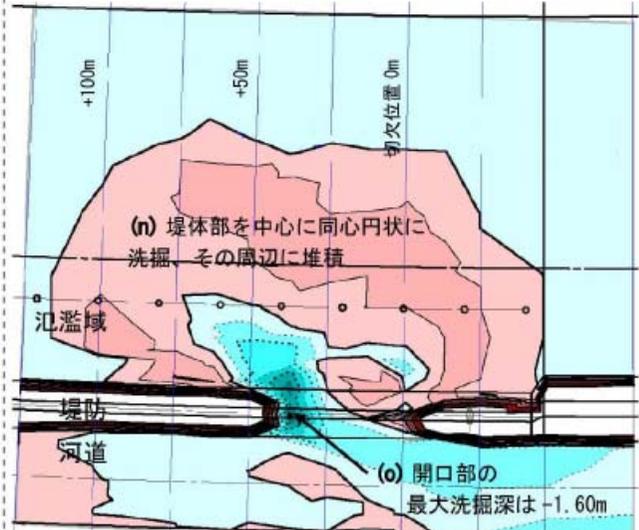
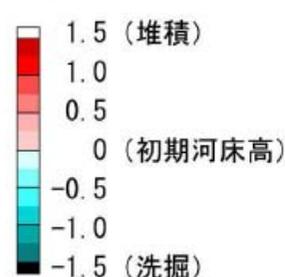
ケース 2 は通水後のコンター図なし

凡例

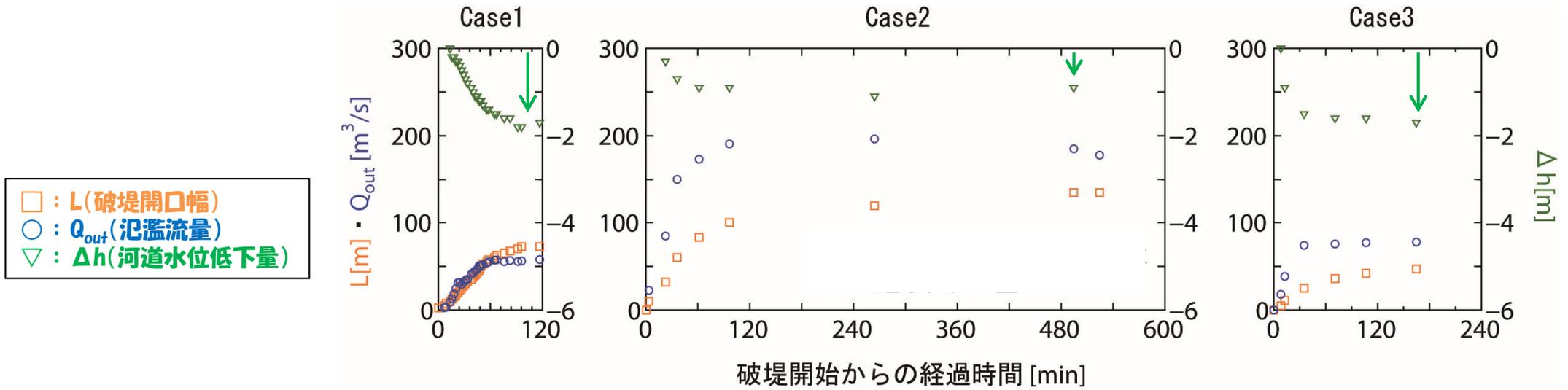
PIV 流速 [m/s]



コンター図 [m]



模型実験結果(時系列)



最終破堤幅
最終破堤幅/河道幅

73m
9.1

135m
4.5

47m
1.6

氾濫流量
河道流量
氾濫流量/河道流量

58m³/s
70m³/s
83%

178m³/s
315m³/s
56%

78m³/s
100m³/s
78%

・川幅が広い場合、河道水位は低下しづらくなり、破堤開口幅や氾濫流量は大きくなる。

・河床勾配を緩くした場合、開口幅は拡がりづらい。一方で、開口部下流側の堤体周辺に局所洗掘が生じる。

(参考)破堤に伴う河道内水位の低下を抑制する実験概要

実験概要

前述の緩勾配破堤実験ケース3

(川幅 $B=30\text{m}$ ・河床勾配 $1b=1/5000$ ・ $Q_{in}=100\text{m}^3/\text{s}$)

破堤初期段階では正面越流に近い形態であったが、破堤進行とともに河道内水位が低下し、途中から下流への破堤拡幅が卓越

川幅が十分広く、破堤により河道内水位が下がらない条件を再現するために、水路下流端に注水し、水位を保持する条件で実験を実施。



実験状況

タワー上空より撮影

河道上流より撮影



越水開始 13:41:25



325 秒後 (現地換算 24.2 分後) 13:46:50



150 秒後 (現地換算 11.2 分後) 13:44:00



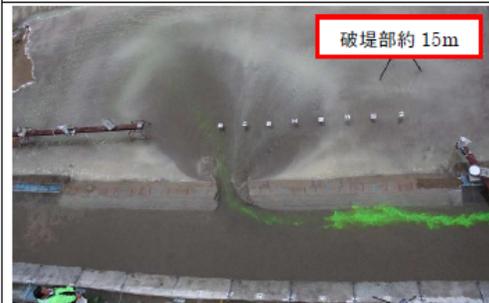
915 秒後 (現地換算 68.2 分後) 13:56:40



185 秒後 (現地換算 13.8 分後) 13:44:30



1965 秒後 (現地換算 146.5 分後) 14:14:10



205 秒後 (現地換算 15.3 分後) 13:44:50



通水後 (通水停止指示 14:21:10)



越水開始 13:41:25



325 秒後 (現地換算 24.2 分後) 13:46:50



150 秒後 (現地換算 11.2 分後) 13:44:00



915 秒後 (現地換算 68.2 分後) 13:56:40



185 秒後 (現地換算 13.8 分後) 13:44:30



1965 秒後 (現地換算 146.5 分後) 14:14:10



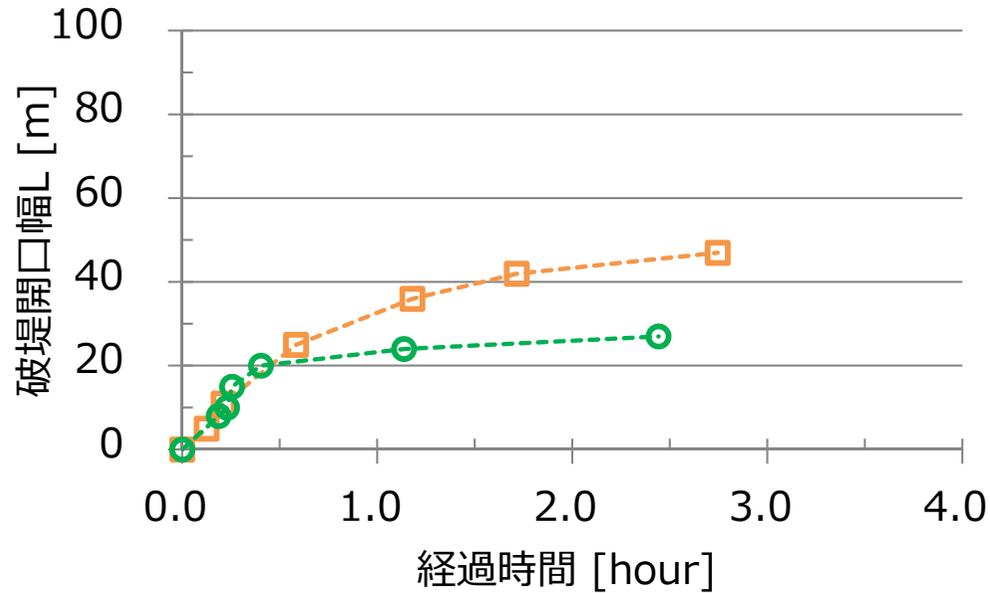
205 秒後 (現地換算 15.3 分後) 13:44:50



通水後 (通水停止指示 14:21:10)

実験結果

【開口幅時系列】

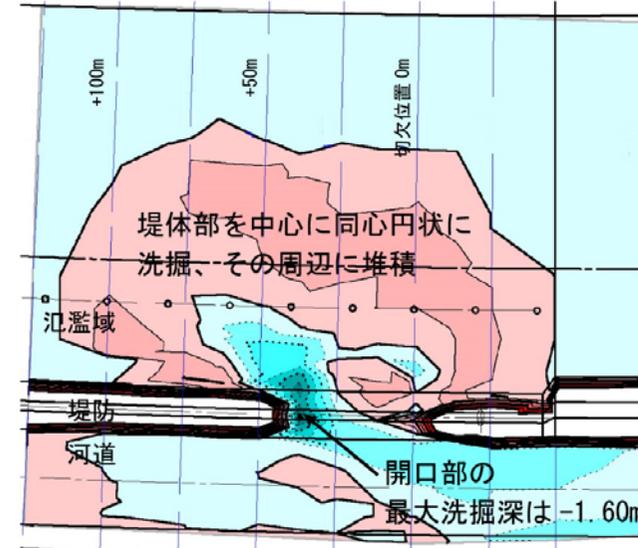


- 前述の緩勾配実験 (Qin=100m³/s)
 (氾濫流量≒78m³/s)
- 下流端から流量供給 (Qin=100m³/s+下流からQin=100m³/s)
 (氾濫流量≒150m³/s)

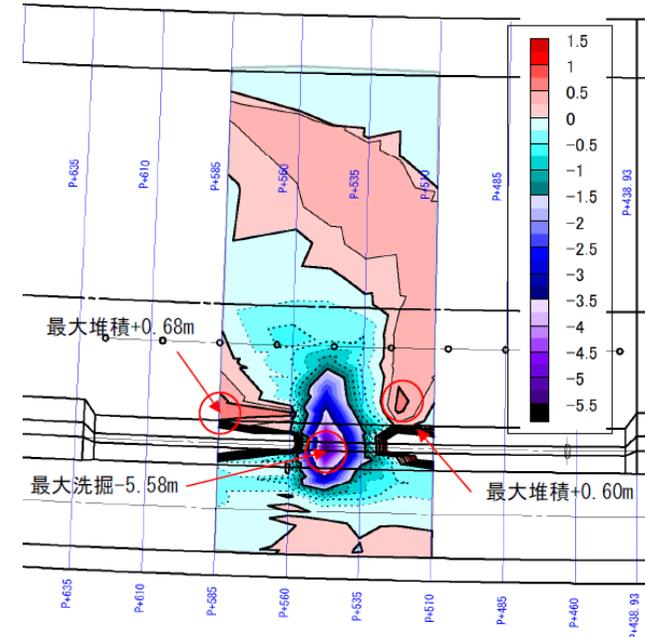
- ・破堤拡幅初期段階では拡幅速度に差はない
- ・最終破堤幅は今回の下流流量供給条件の方が拡がりづらかった
- ・一方で開口部の局所洗掘深は堤防高の2倍程度

【実験後地形】

前述の実験(ケース3)



今回の実験



3. 数値計算による検討

計算モデルの概要と再現性検証
様々な河道形状での検証

(参考) 破堤計算モデルNays2D Breachの概要

【破堤モデル概要】

基本となるモデルは2次元浅水流河床変動計算
iRIC Nays2D¹⁾

堤防部分の破堤拡幅進行は、千代田実験水路での
破堤実験結果より得られた無次元掃流力と堤体崩
壊量の以下の関係式を組み入れてモデル改良²⁾

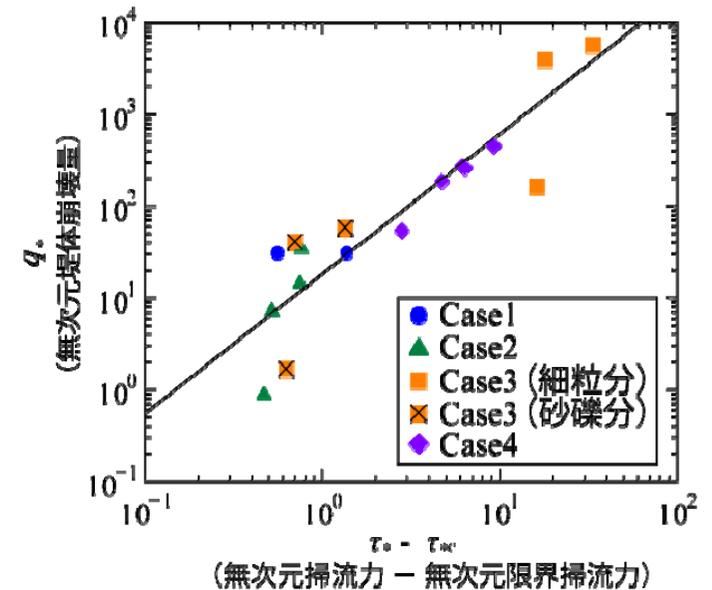
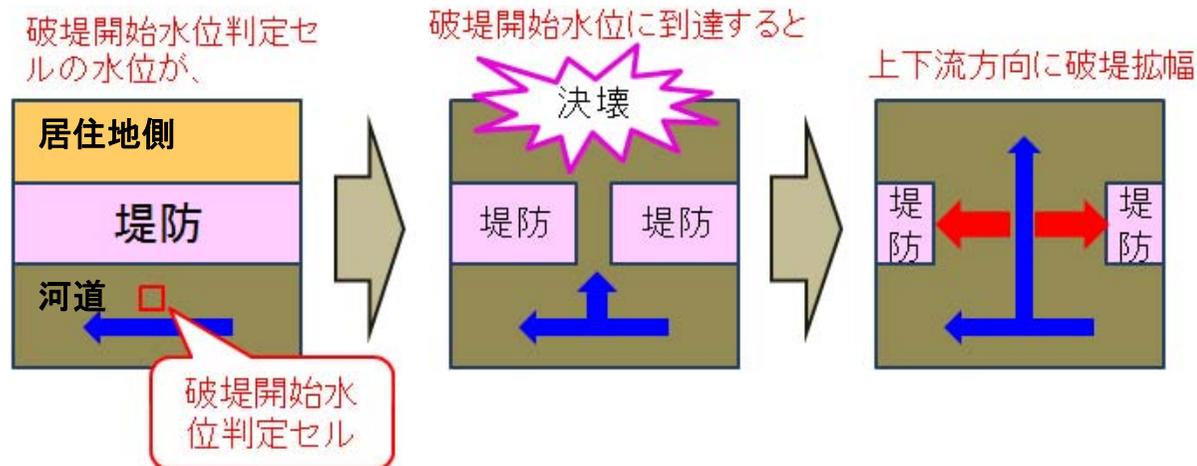
$$q_* = \frac{dV}{dt} \frac{1}{(\sqrt{sgd_{50}^3 \cdot B_m})} (1 - \lambda) = \alpha_* (\tau_* - \tau_{*c})^{\beta_*}$$

ここで、 q_* :無次元堤体崩壊量、 V :堤体崩壊量、 t :時間、 s :砂粒の水中比
重、 g :重力加速度、 d_{50} :砂粒の50%通過粒径、 B_m :堤体下幅、 λ :空隙
率、 τ_* :無次元掃流力、 τ_{*c} :無次元限界掃流力、 α_* ・ β_* :係数

1) iRIC, <http://i-ric.org/ja/>

2) 柿沼, 飛田ら:千代田破堤実験と数値計算モデル開発, 寒地土木研究所月報, No732, 2014年5月

【破堤モデルの模式図】



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報告書

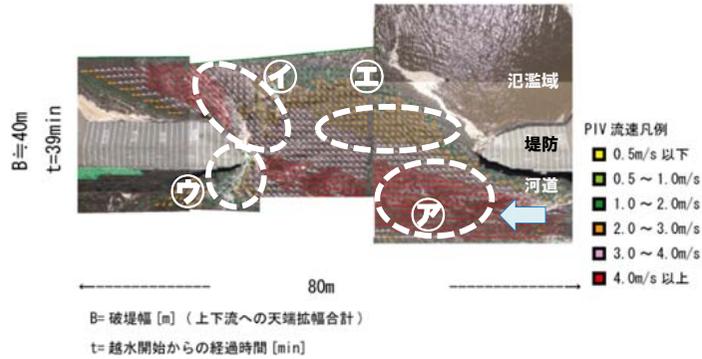
平成24年10月

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

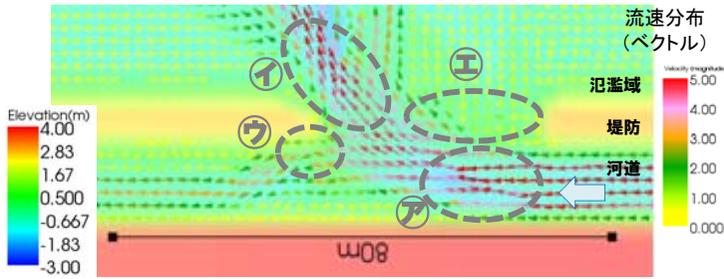
破堤計算モデルの再現性検証(千代田現地破堤実験)

【流況】

実験結果 (B=40m・t=39min)

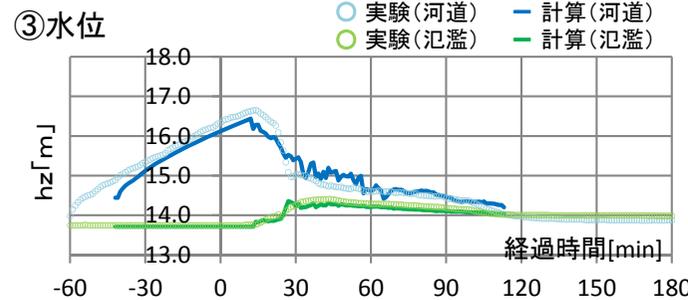
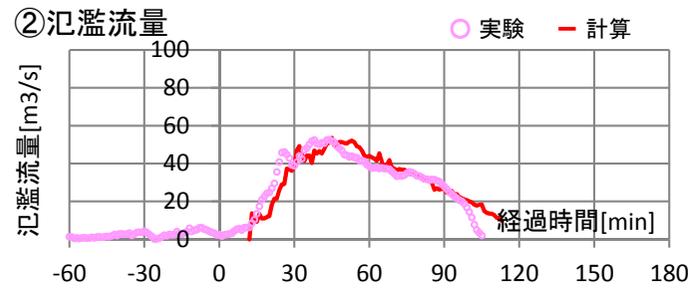
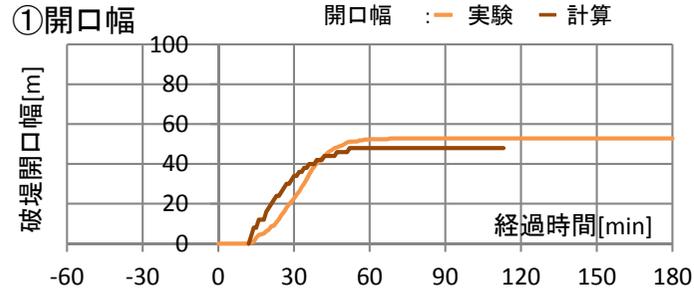


計算結果 (B=40m・t=38min)



- ㊦ 河道から開口部への流れ
- ㊧ 開口部から氾濫域への斜めに速い流れ
また堤体裏法尻部は斜めに侵食
- ㊨ 一方で流れは表法部から河道へ
- ㊩ 開口部上流などは低流速
㊧のような主流の存在

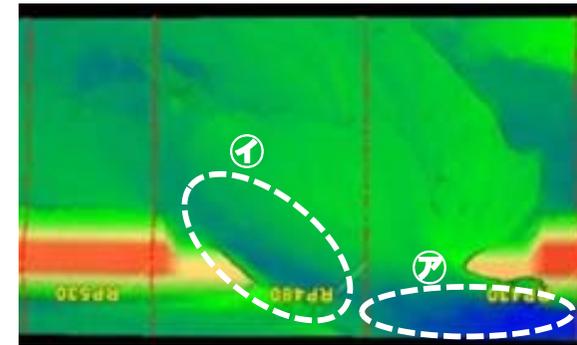
【時系列】



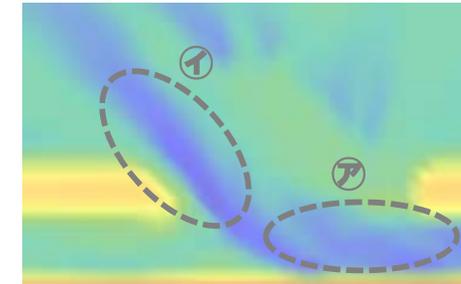
- ① 破堤初期の加速度的な進行、途中から進行速度の低減など概ね再現
- ② 氾濫流量の立上、ピーク流量など概ね再現
- ㊨ 破堤拡幅に伴う河道の急激な水位低下、氾濫域の水位上昇など概ね再現

【実験後地形】

実験結果(レーザー測量)



計算結果

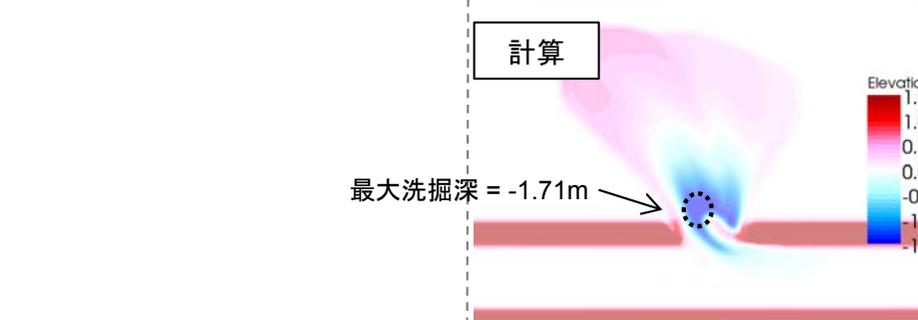
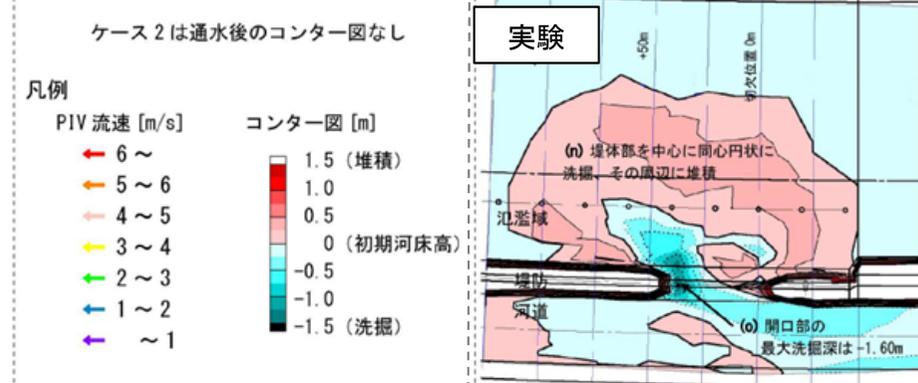
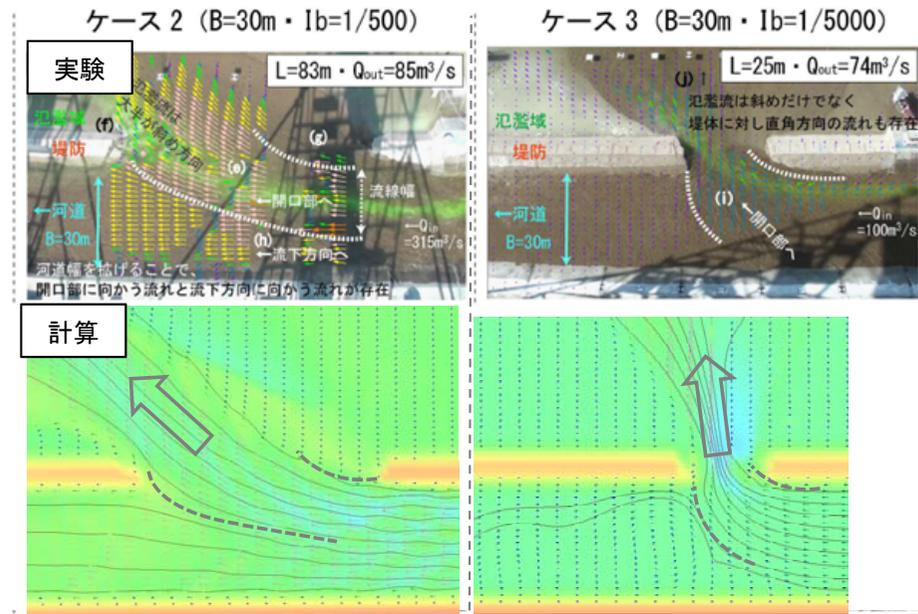


- ㊦ 河道部の河床低下
- ㊧ 開口部下流の斜め形状の堤体侵食
開口部から氾濫域への河床洗掘
及び周辺の堆積

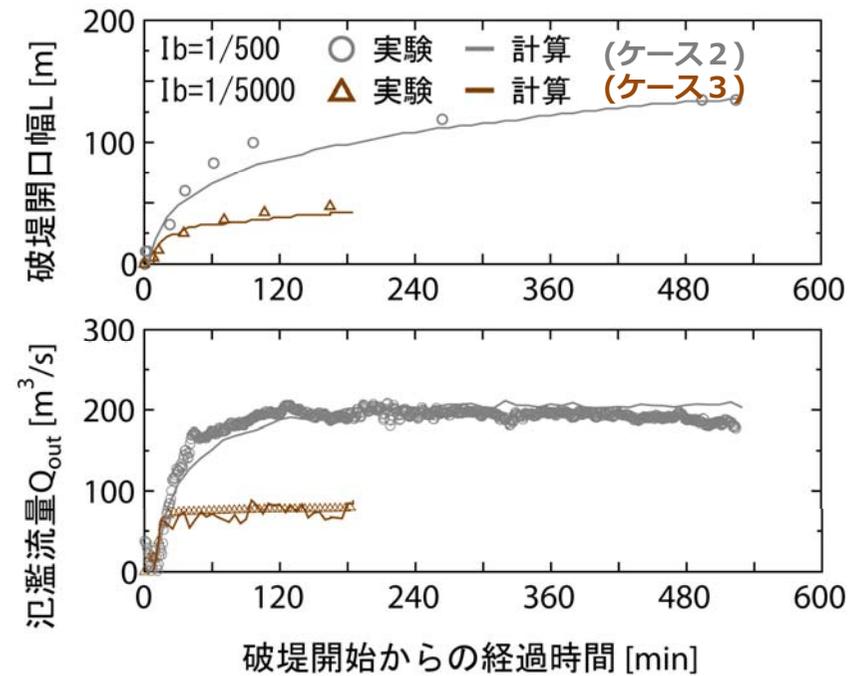
流況、破堤進行過程、実験後の形状など概ね現象を再現

破堤計算モデルの再現性検証(つくば縮尺模型実験)

【流況・実験後地形】



【時系列】

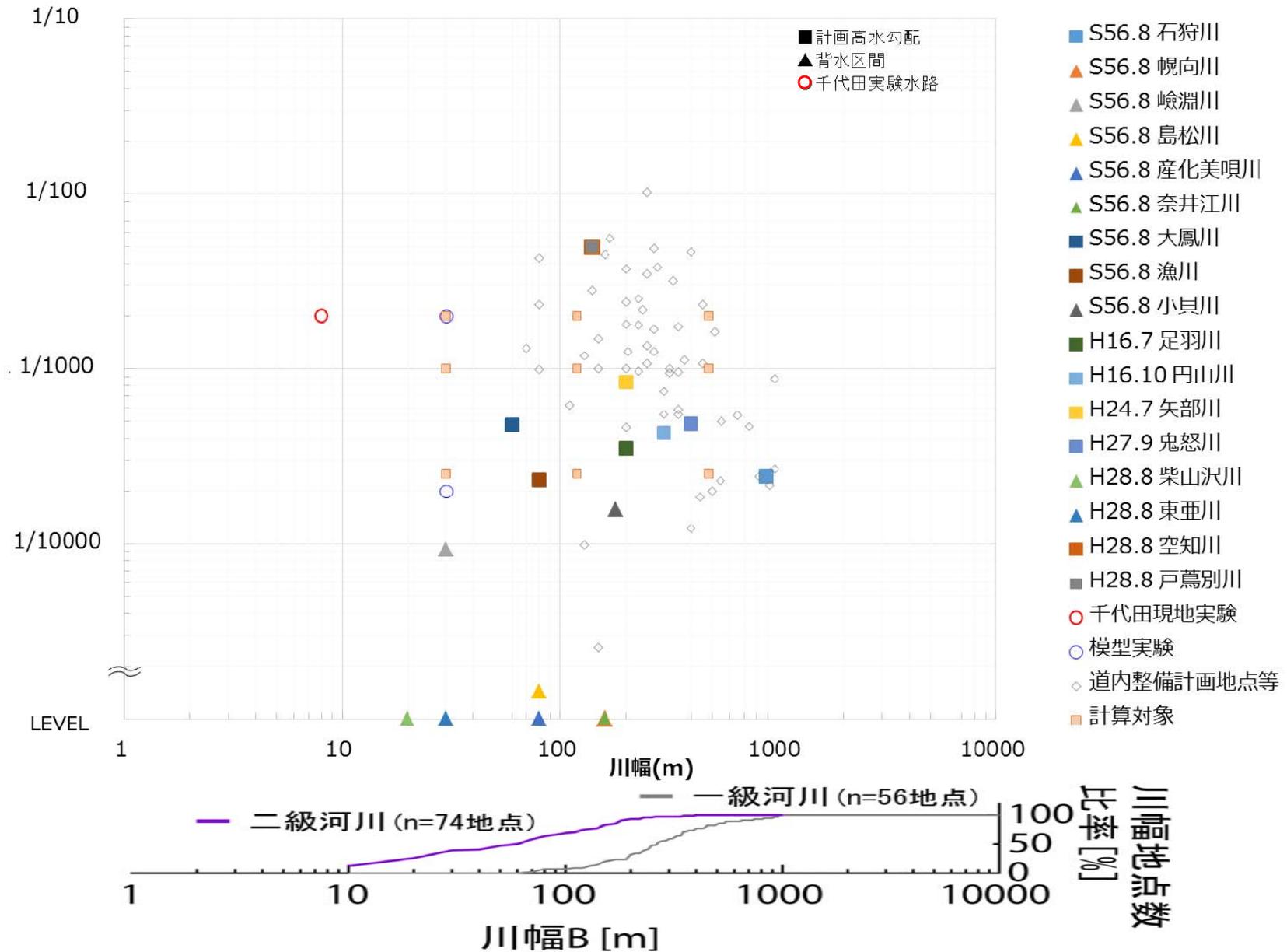


以上より千代田現地実験をもとに開発した数値計算モデルは、千代田実験水路での現地破堤実験だけでなく、河道条件(川幅・河床勾配)を変えた場合でも破堤現象の傾向を表現できることを確認

3. 数値計算による検討

計算モデルの概要と再現性検証
様々な河道形状での検証

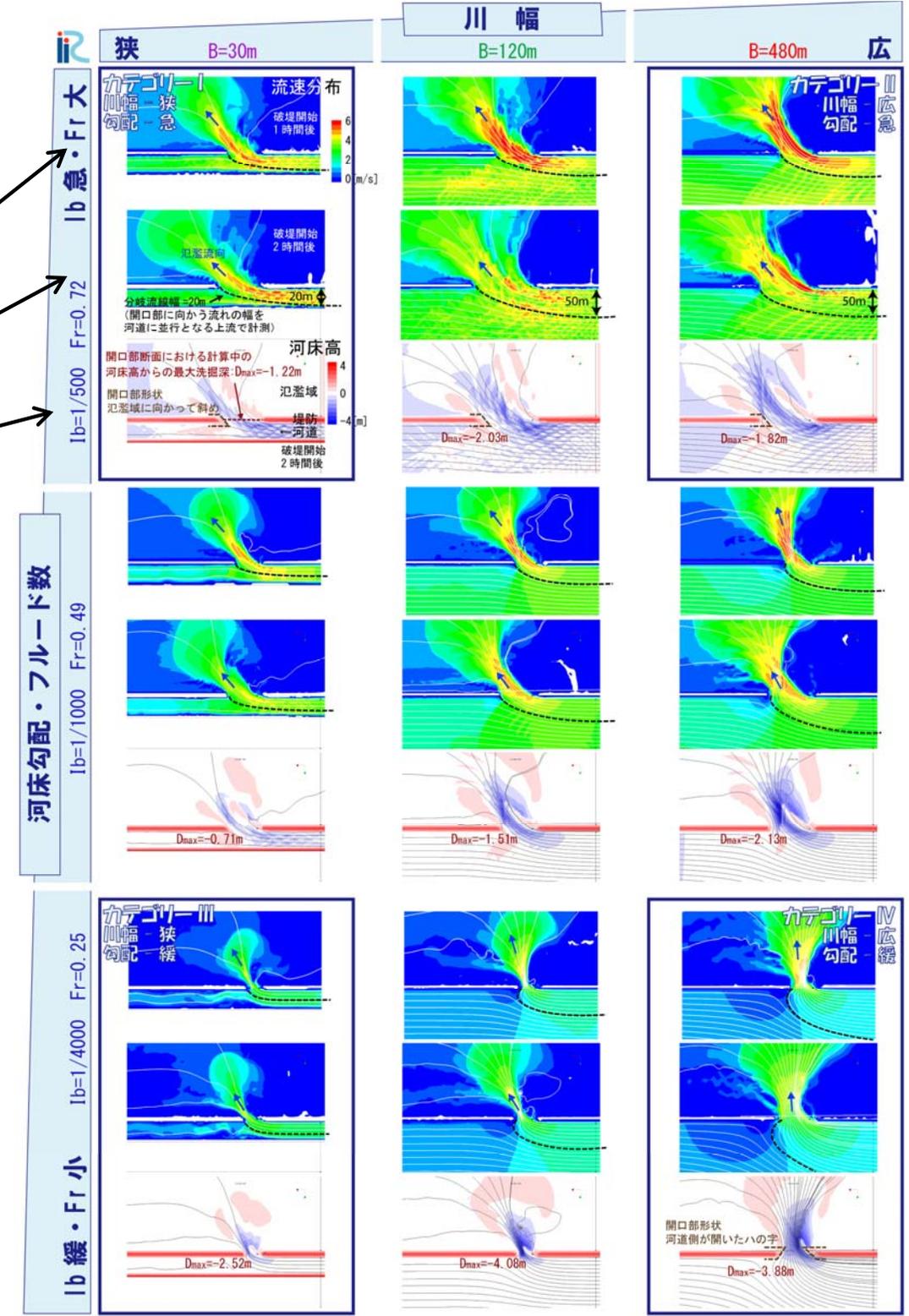
河道特性の選定と計算条件



○は、道内一級河川の河川整備方針にある基準地点、及び主要地点
 これらを参考に■で示した川幅3パターン×河床勾配3パターンの9ケースを対象に検証
 (※勾配はHWL勾配)

河道形状に応じた破堤現象特性 (計算全ケース) ～流況と河床形状

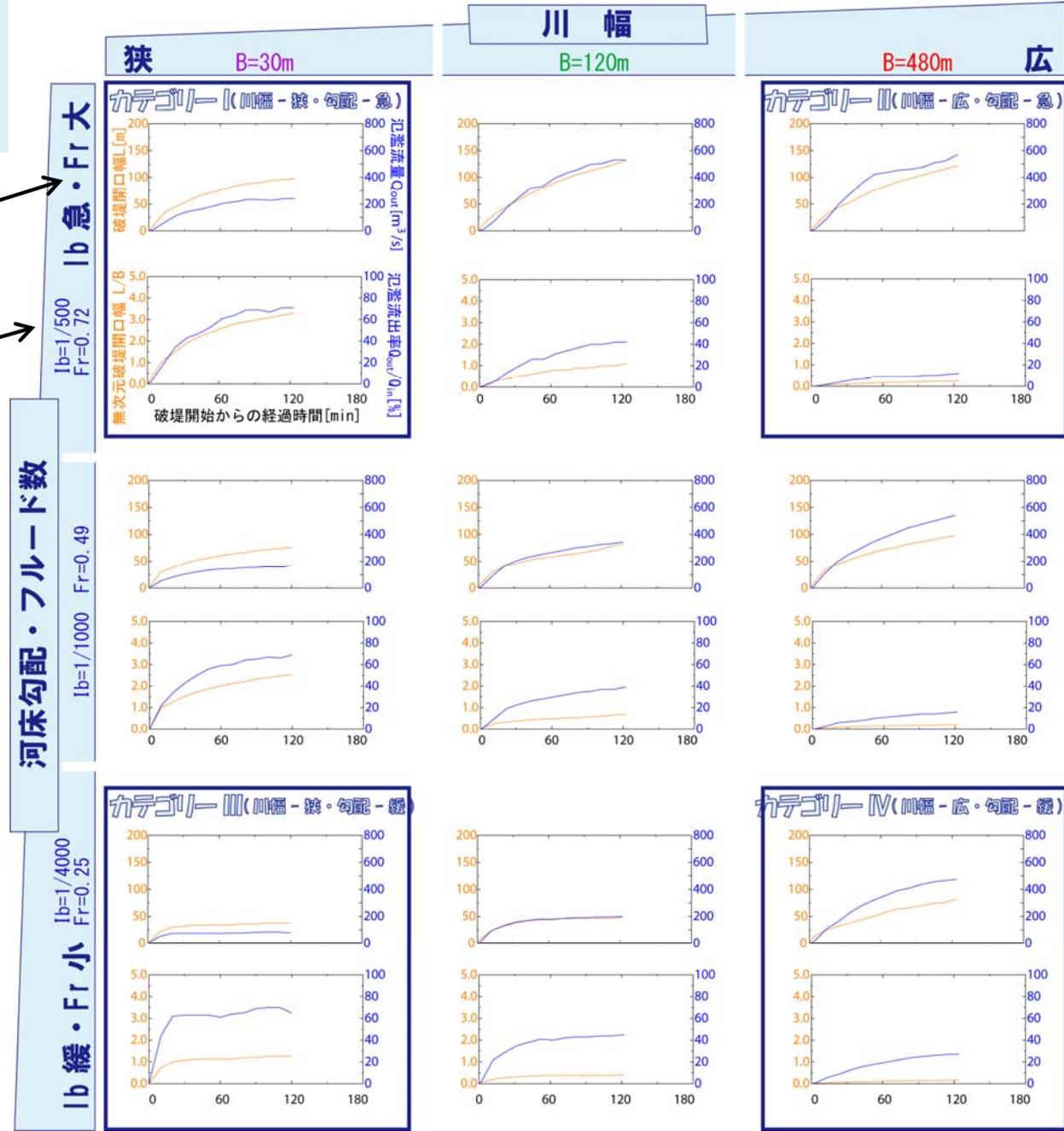
流速分布(1h後)
流速分布(2h後)
河床高(2h後)



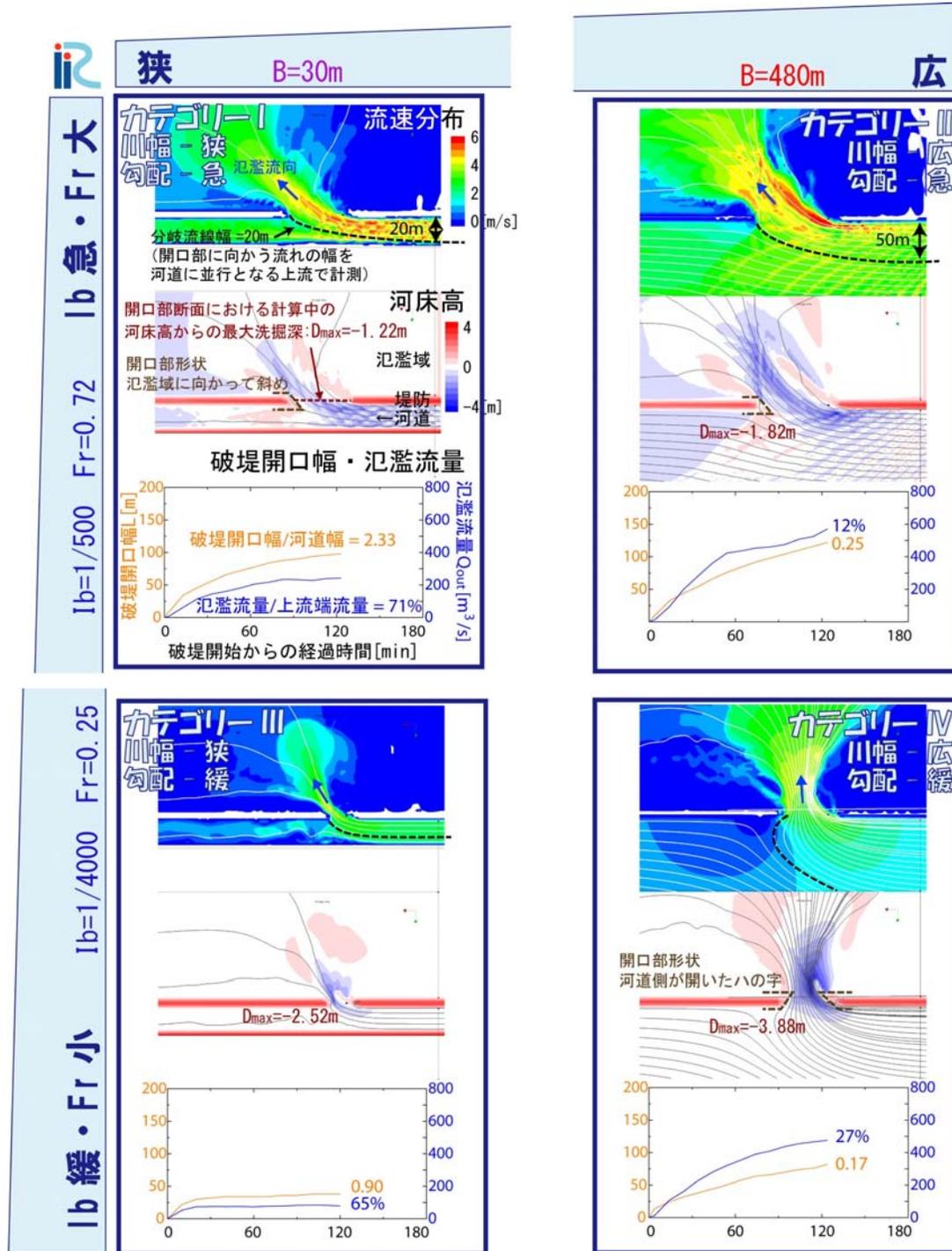
河道形状に応じた破堤現象特性 (計算全ケース) ～破堤開口幅と氾濫流量

破堤開口幅
氾濫流量

無次元開口幅(破堤開口幅/川幅)
氾濫流出率(氾濫流量/河道流量)



河道形状に応じた破堤現象特性(四隅抜粋)～現象の比較



河道状況に応じた破堤現象に関する整理(案)

川幅狭

【水位低下早い⇒破堤拡幅しにくい】
被害軽減には特に早期の破堤拡幅抑制が必要

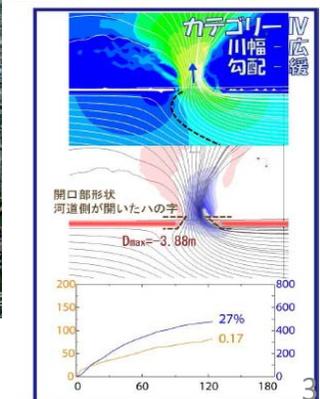
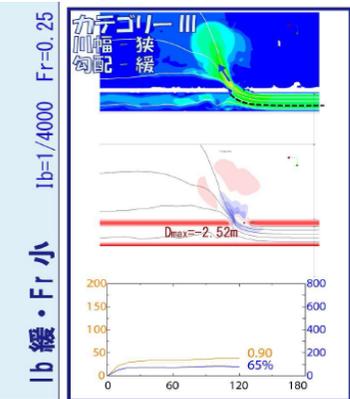
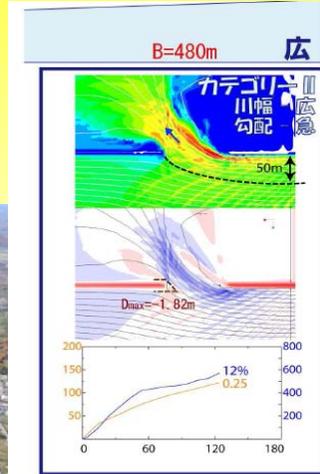
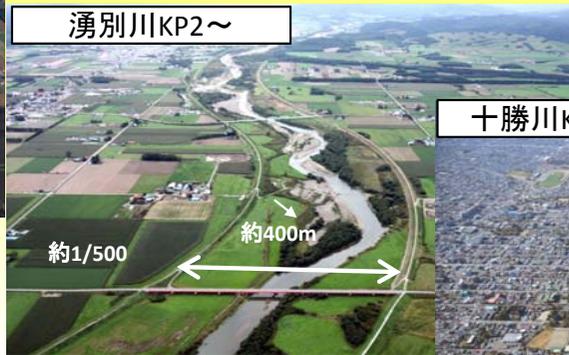
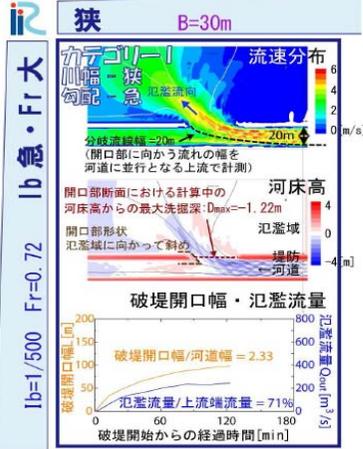
川幅広

【水位低下遅い⇒破堤拡幅しやすい】
破堤拡幅が長期に亘り、
破堤拡幅抑制効果が発現しやすい

急勾配

【氾濫流縦断方向卓越⇒破堤下流進捗、裏法尻先行】

下流側裏法尻の破堤拡幅抑制工が効果的、決壊口流速が速く投入ブロックが転動しやすい



緩勾配

【氾濫流は開口部中央部分集中⇒表法の侵食が先行、破堤口形状、深掘れ顕著】
破堤開口幅は狭いが深掘れにより締切資材量が多く必要

破堤抑制工，締切に使用するブロックに関する検討

国土交通省 北海道開発局
(国研)土木研究所 寒地土木研究所

抑制工，締切に使用するブロックに関する検討：背景

決壊口へのブロック投入は早い流速，水位差，投入の影響により，一様流の中に静置することを前提とされた移動限界流速と比べ，転動しやすい。

→水位差等外力の影響を定量的に評価する必要がある。

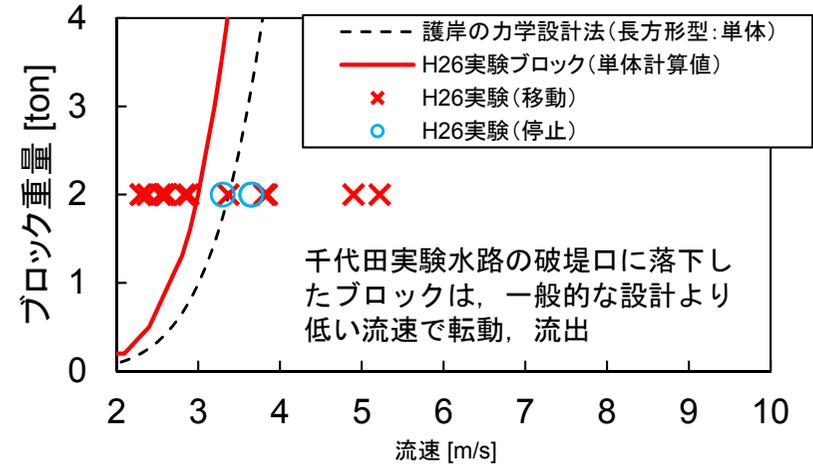


S49多摩川の決壊口へのブロック投入

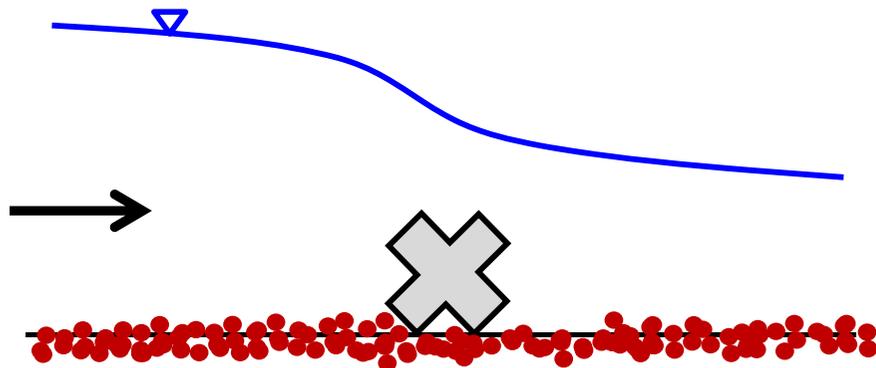
ブロックは数10m流出



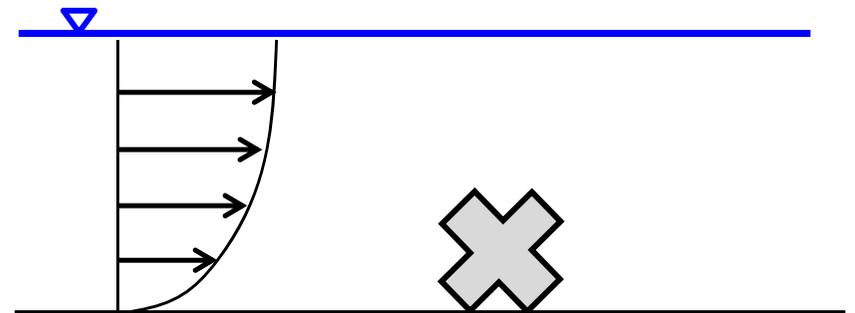
千代田実験水路による抑制工実験



出典)国土交通省関東地方整備局京浜河川事務所ホームページより
http://www.keihin.ktr.mlit.go.jp/tama/02miryoku/tama_midokoro/property/10_4.htm



実際の条件(水位差，移動床，急変流...)



一般的な設計基準で想定している条件
 (護岸の力学的設計法)

抑制工，締め切りに使用するブロックに関する検討：背景

移動床中に投入されたブロックは，ブロック下部の河床変動によって沈下する．結果として，締め切りに必要なブロック数が増加する．



北海道河川財団資料

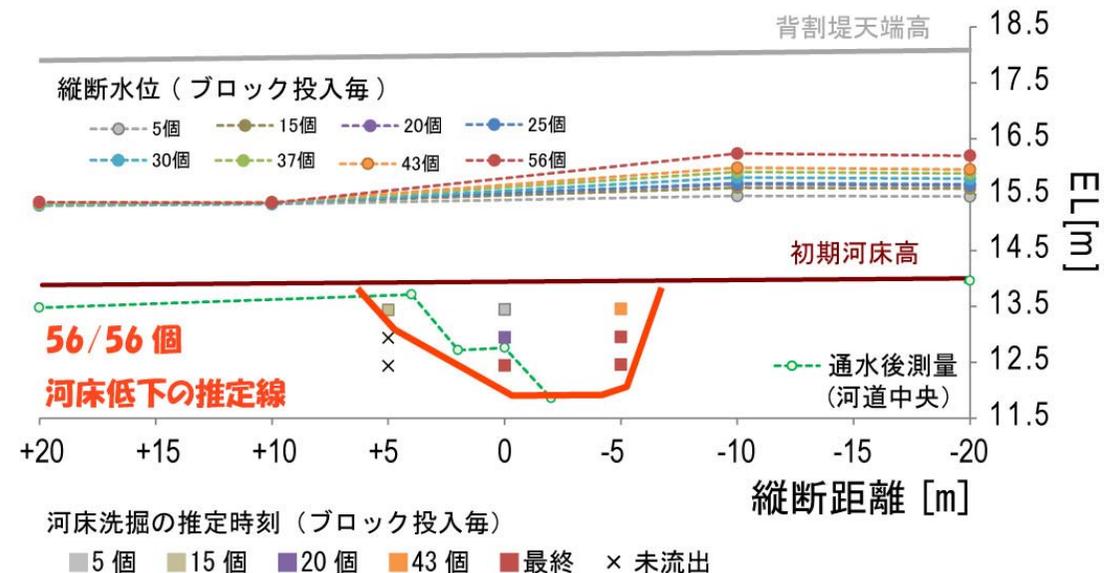
平成27年度締め切り実験



ブロック下部の河床変動による沈下．

現地締め切り実験では，2m程度ブロックが沈下（ブロック高さ1.2m程度）し，必要ブロック数が増加する．締め切りに時間がかかる．

→沈下メカニズムを把握し，沈下しづらく効率的に締め切れるブロックの提案．



目的

抑制工，締め切り等に効果的な，動きづらく，沈下しづらいブロックについて検討

1. 水面からの投入や水位差が，ブロックの移動限界に与える影響の把握.
2. 水位差がブロックに作用する流体力へ与える影響を実験的に定量化し，水位差を考慮したブロックの移動限界基準を提案.
3. 移動床上に置かれたブロックの沈下原因について明らかにする.
4. 流出しづらく，かつ沈下せずに積み上げられるブロックの投入方法，順番等について検討する.



トラスフット



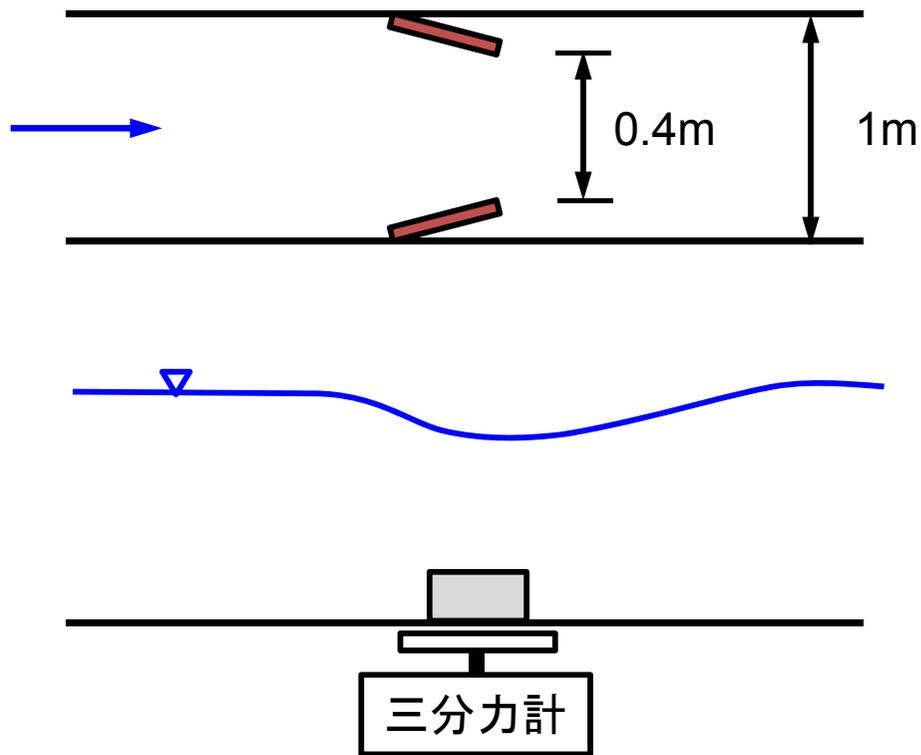
平型ブロック



袋詰め根固め

水路実験： ブロック移動限界に対する投入，水位差の影響

- 寒地土木研究所 高速循環水路（平坦床，水路幅1m）
- 底面：静止実験，投入実験は粗度付け．抗力測定時は鋼板．
- 水路急縮により水位差を発生させる．
- 千代田実験水路を想定した1/10縮尺模型

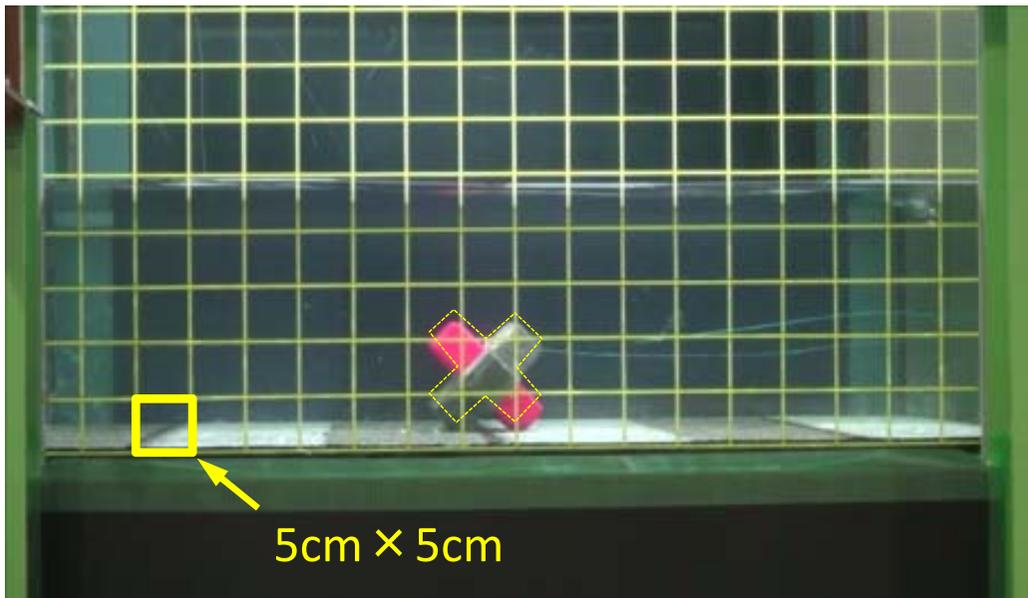


ブロック前後断面の流速分布を測定

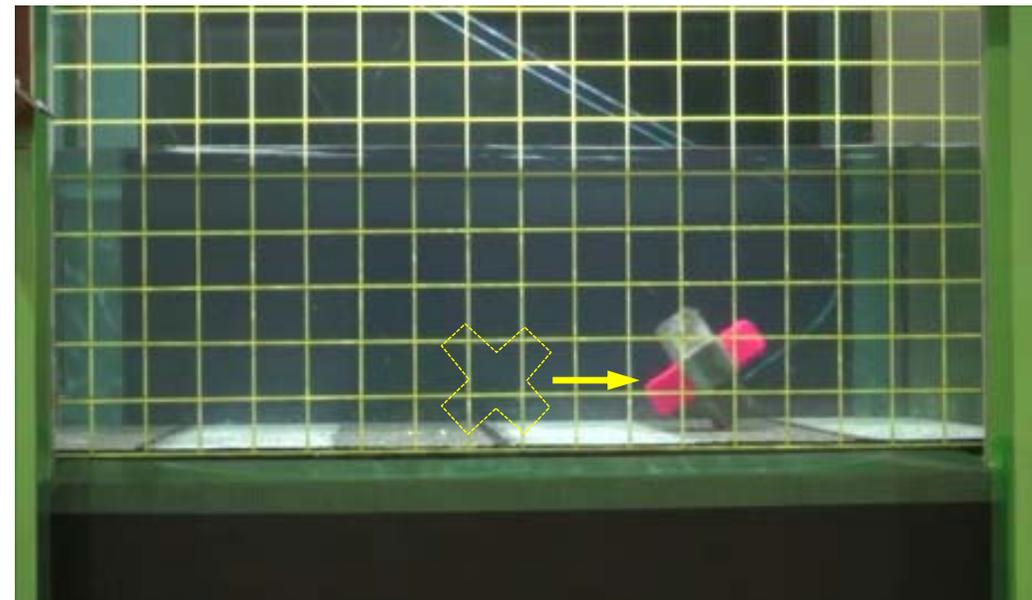
ブロック移動限界実験： 底面静止状態

- 底面にブロックを設置した状態から流量を段階的に増加させる。
- ブロックが移動を開始した時点の流量で複数回の試行を行い、移動開始条件を判定。
- 移動開始流量, 並びにその前後の流量時の流速を測定。

トラスフット横置き時の実験



静止時



移動時

ブロック移動限界実験： 水面から投入状態

- 静止実験と同様に段階的に流量を増加させる.
- 水面直上からブロックを投入し, 底面到達後のブロック移動の有無から, 投入した際の移動限界条件を判定.

トラスフット縦方向の実験



底面到達後, 停止



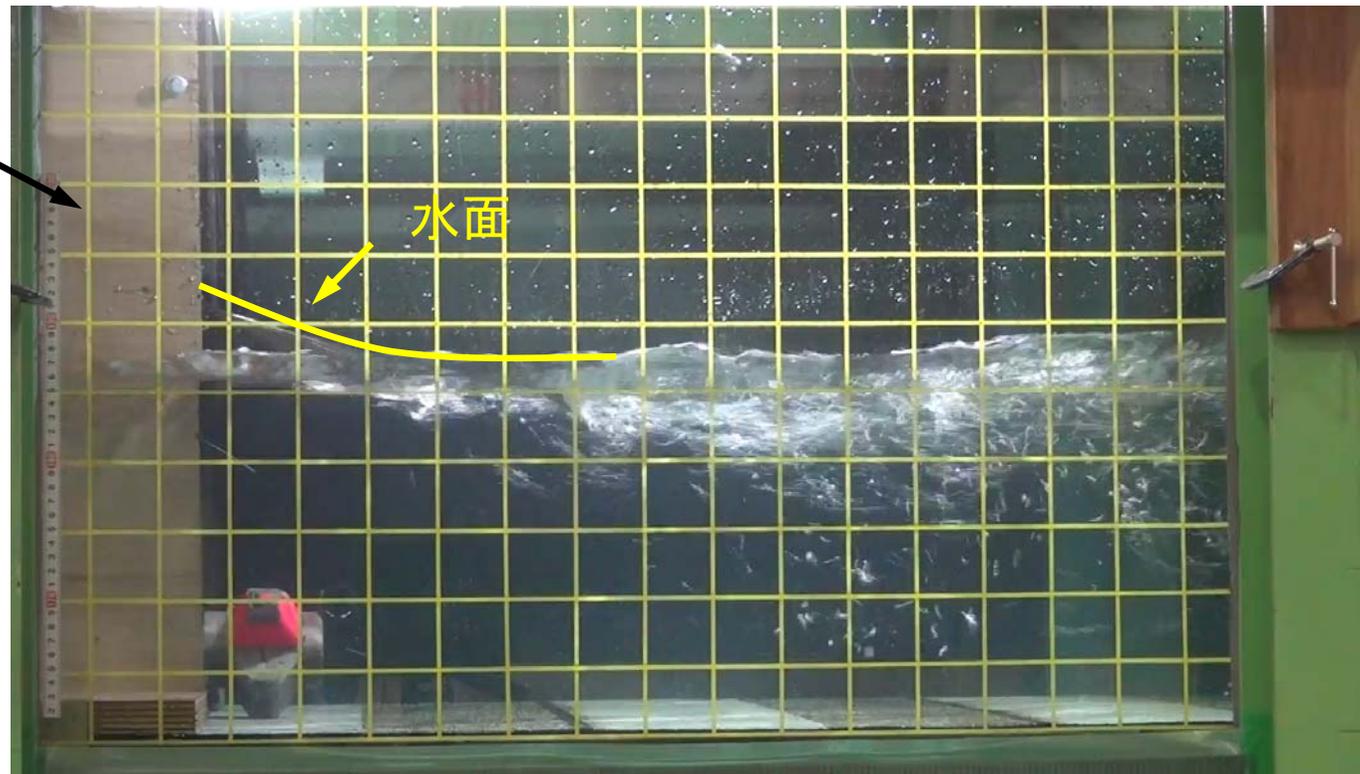
底面到達後, 転動

ブロック移動限界実験： 水位差がある状態

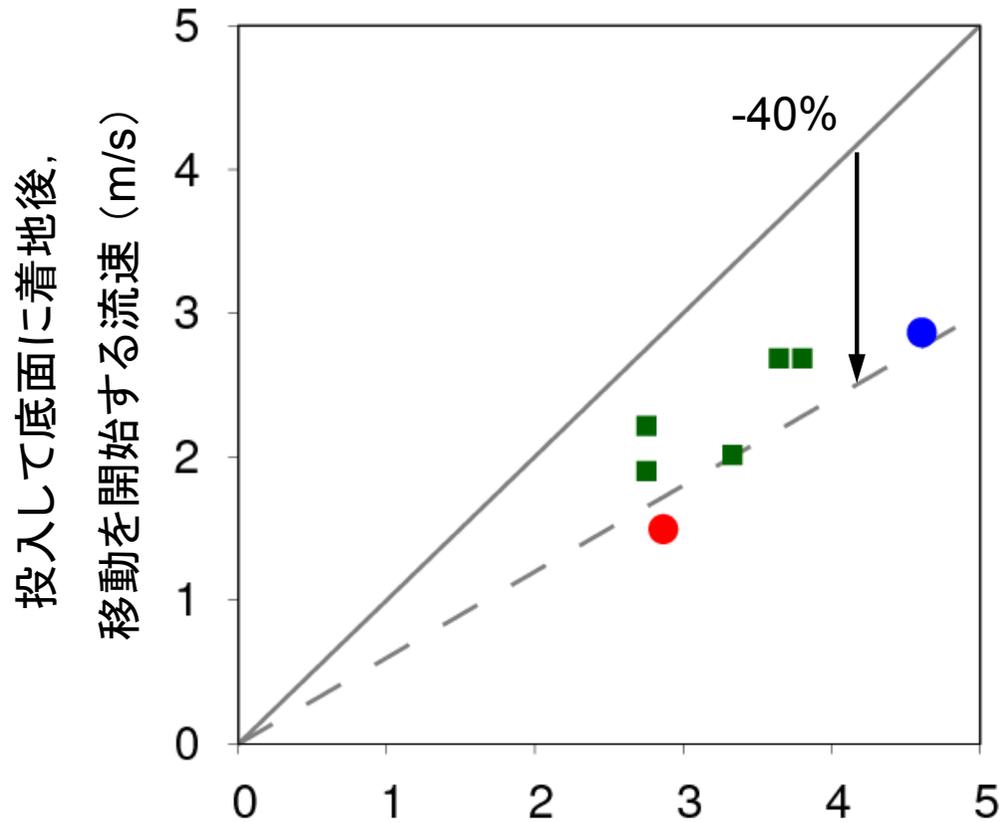
- 水路を急縮させることで水位差を発生させる。
- 水位差が急となる断面の底面にブロックを設置し、静止実験と同様に段階的に流量を増加させ、水位差がある場合の移動限界条件を判定。
- 移動限界状態における流速分布と水位差を測定。

トラスフット縦方向の実験

急縮によって水位差を発生させる



ブロックの移動限界:投入の影響



底面静止状態で移動を開始する流速 (m/s)

- トラスフット縦置き (縮尺1/10, 固定床)
 - トラスフット横置き (縮尺1/10, 固定床)
 - トラスフット型横置き (縮尺1/20, 移動床)
- 山本ら, 2015, 水工学論文集

- 水面から投下されたブロックは, 底面に静止状態で置かれたブロックが移動を開始する流速よりも遅い流速で流出する.
- 投入によって移動限界流速が低下する現象は移動床より固定床のほうが顕著な傾向.
- **ブロック形状, 移動床・固定床によらず, 投入によってブロックの移動限界流速は低下する傾向が示された.**

※ フルード相似による現地換算流速.

※ ブロックがない状態におけるブロック天端高さの流速を指標としている.

投入による移動限界低下現象

○落下時の姿勢

トラスフットが転動する際は、落下時の姿勢によっては、転動、停止に作用する初期モーメントが出る場合があり、それにより転動特性が異なる。

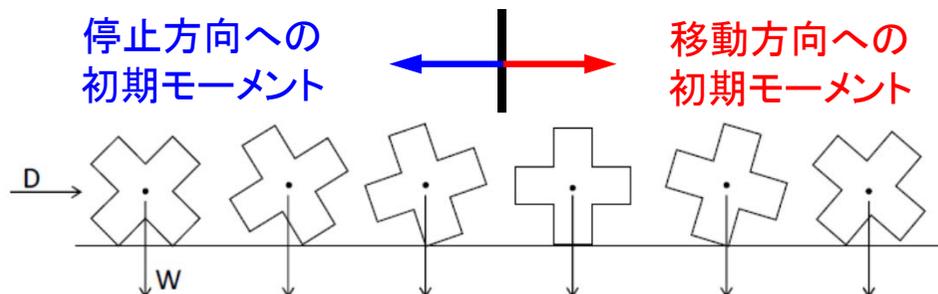
トラスフット横方向投入実験
投入時の転動限界条件以上の流速



○ブロック向きの変化

トラスフット縦方向の実験では、落下時の移動によって向きが変化し、最終的に移動しやすい横向きに変化し、流されやすくなる。

トラスフット縦方向投入実験



山本ら, 2015, 水工学論文集

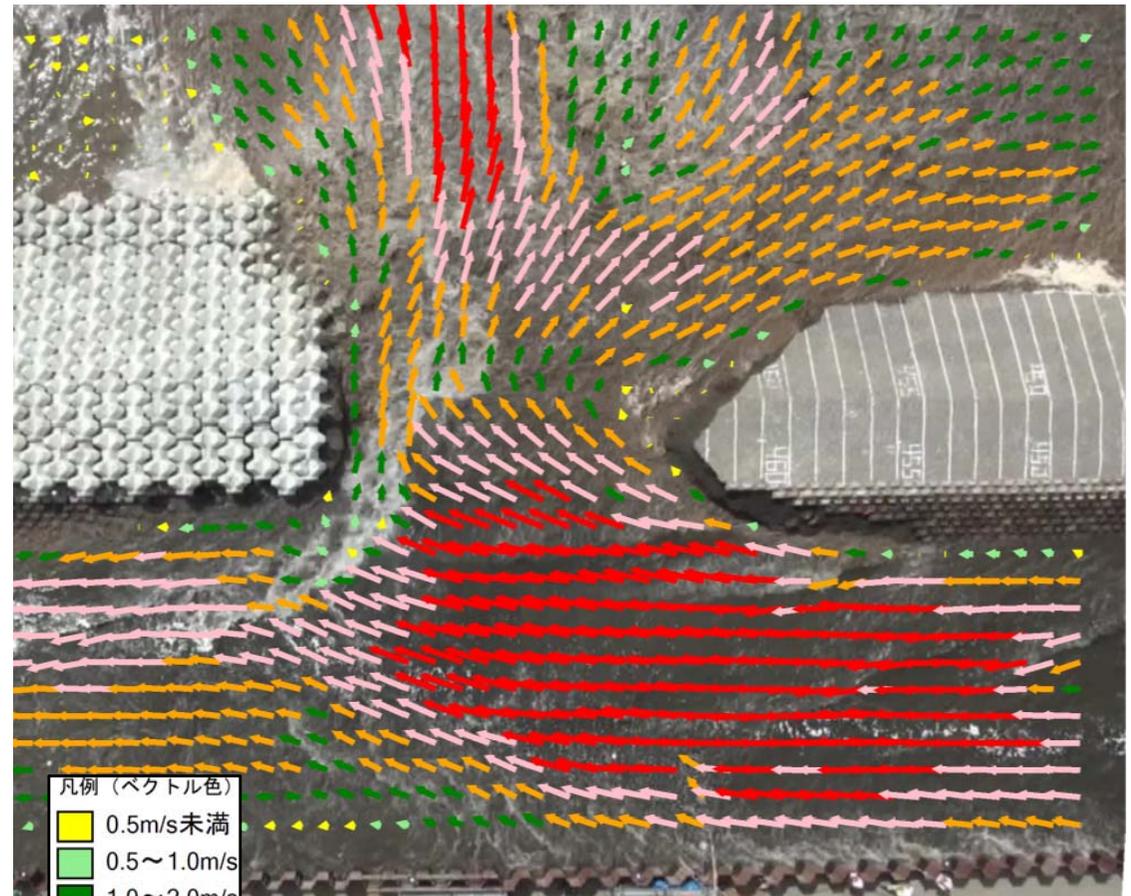
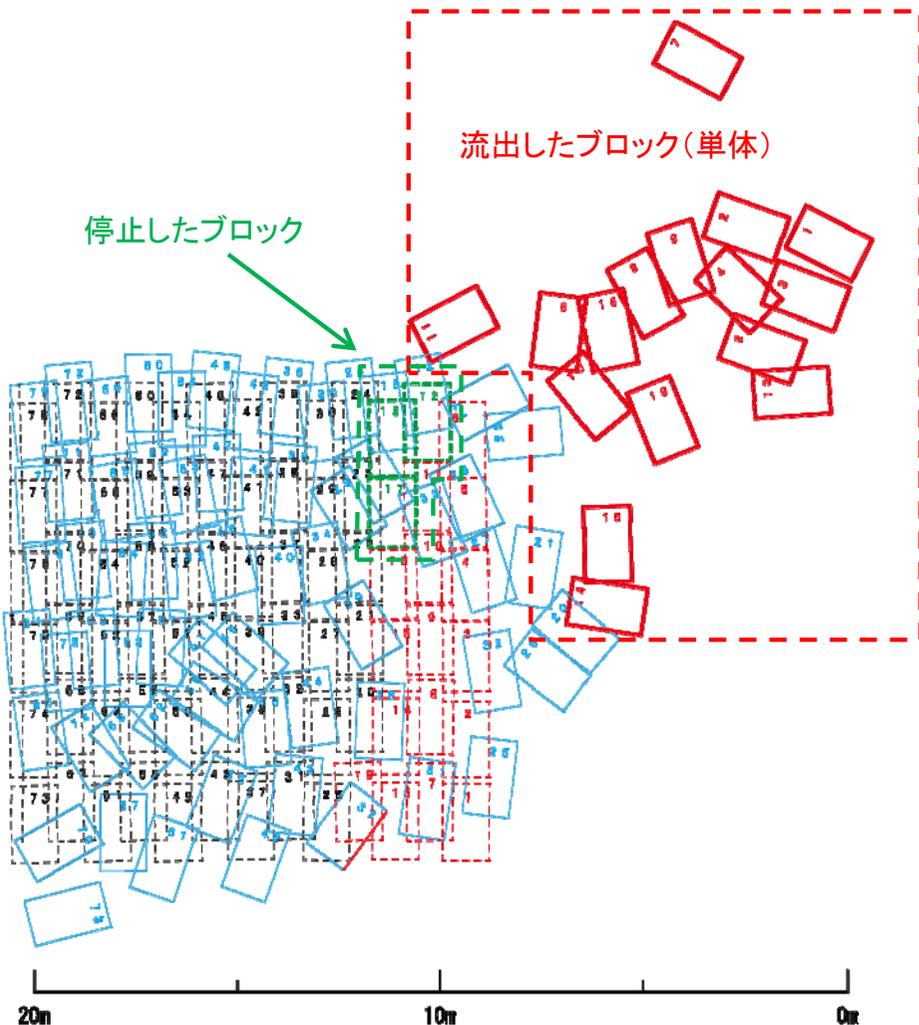
形状に方向性があるブロックでは、移動限界が大きい方向で投入しても、結局流されやすい方向に姿勢を変えてしまう可能性。

→形状の方向性が少ないブロックのほうが、投入後の移動の有無を判断しやすい。

投入による移動限界低下現象

○落下後の滑動，転動運動の影響

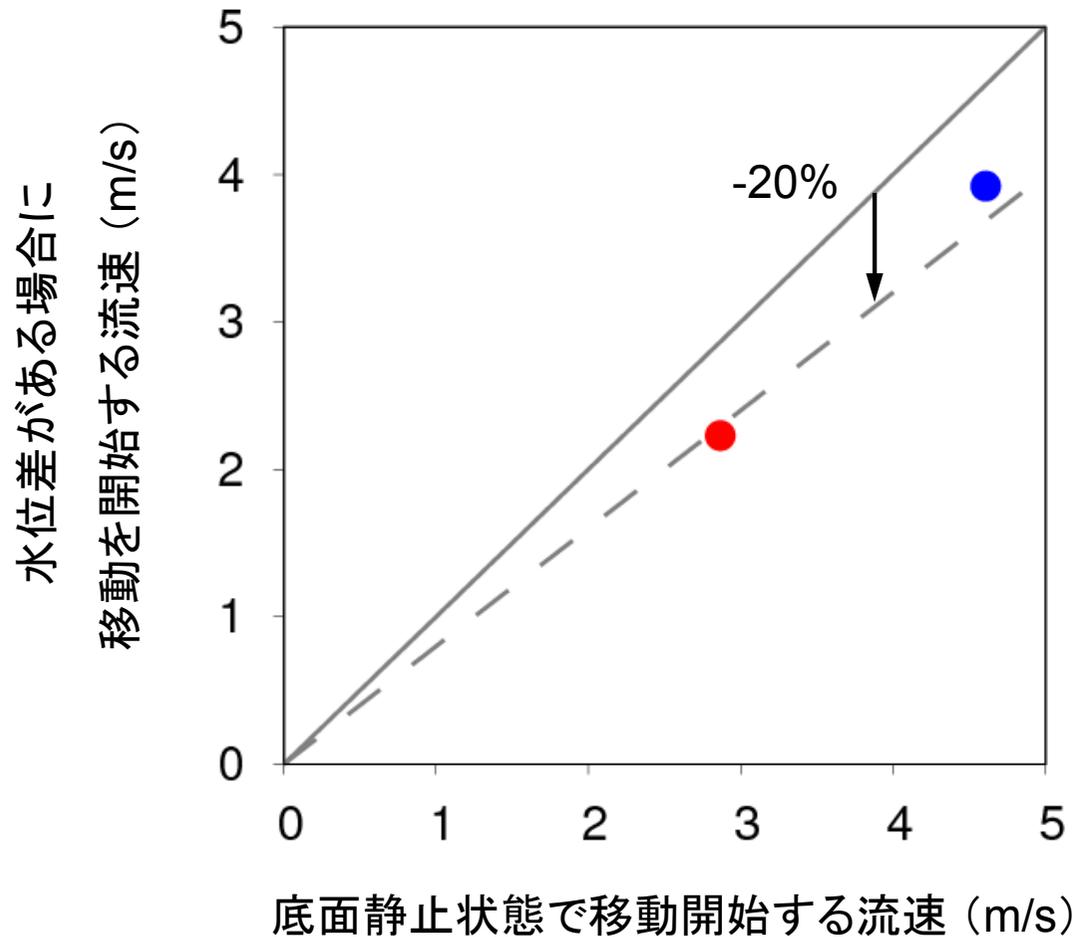
- ブロックは底面到達時には初速度を持ち，流体力と抵抗力を受けながら底面を運動する。
- ある程度の距離を流下した後に停止した場合でも，締切を行う実用上は移動したと等価。



凡例 (ベクトル色)	
0.5m/s未満	0.5~1.0m/s
1.0~2.0m/s	2.0~3.0m/s
3.0~4.0m/s	4.0m/s以上

H26年抑制工現地実験

ブロックの移動限界：水位差の影響



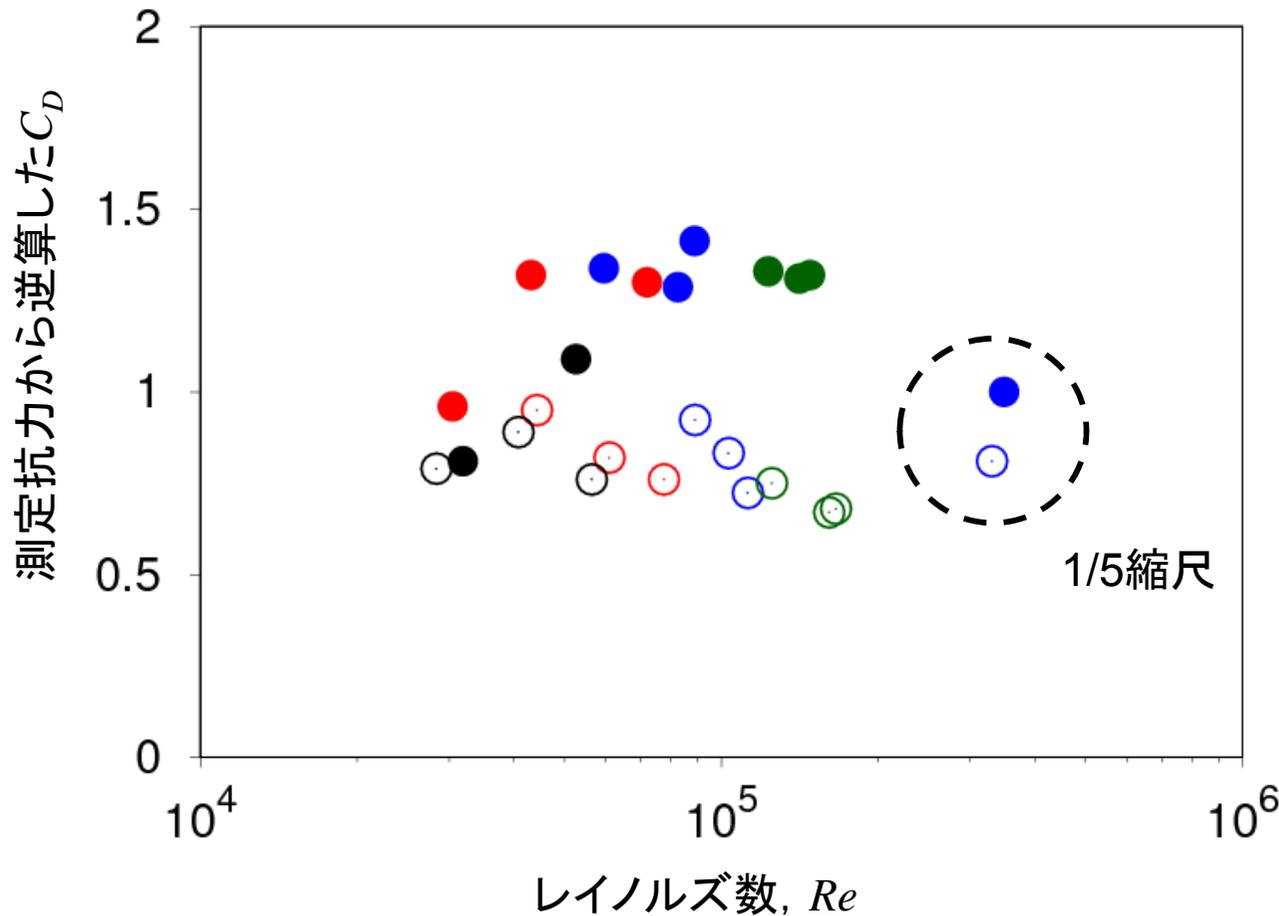
- トラスフット縦置き(縮尺1/10)
- トラスフット横置き(縮尺1/10)

- 水位差があることにより、より遅い流速でもトラスフットは移動を開始する。
- ブロック前後断面に水位差が存在する場合は、底面静止状態から移動を開始する流速よりも遅い流速で移動する可能性がある。

※ フルード相似による現地換算流速。

※ ブロックがない状態におけるブロック天端高さの流速を指標としている。

水位差が物体抗力に与える影響



白抜き: 水位差無し
塗りつぶし: 水位差あり

青: トラスフット横

緑: トラスフット縦

赤: 平型ブロック

黒: 袋詰め根固め

$$C_D = \frac{2F_D}{\rho_w A_D U^2}$$

$$Re = \frac{UD}{\nu}$$

- 同程度のレイノルズ数の範囲でも、水位差有りのほうが C_D が大きい。
⇒水位差による抗力の増加

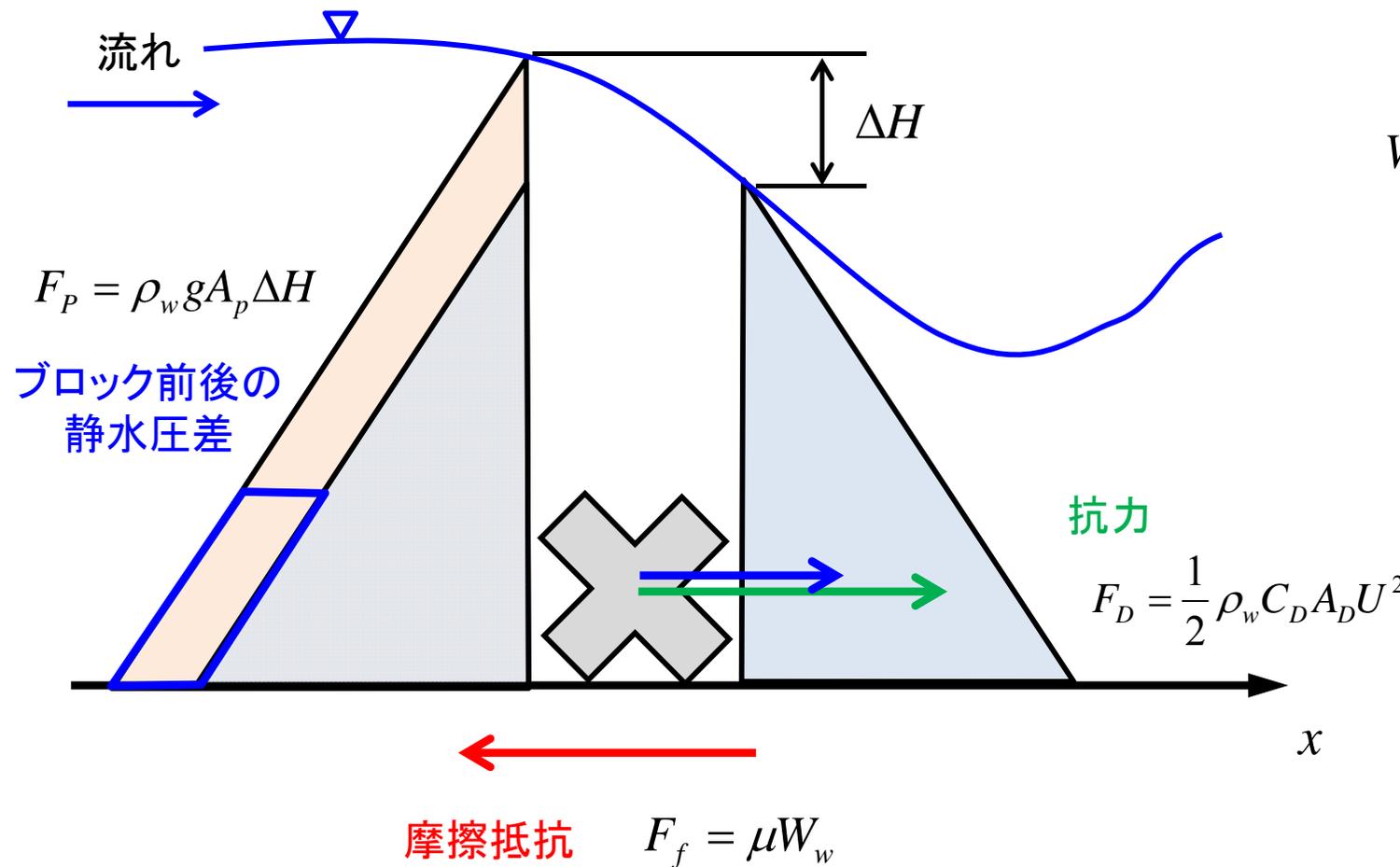
F_D : 測定された抗力
 U : ブロック近傍流速
 ρ_w : 流体の密度
 C_D : 抗力係数
 A_D : 抗力作用面積
 D : ブロック高さ
 ν : 動粘性係数

水位差がブロック転動限界に及ぼす影響

- 護岸の力学的設計法におけるブロック移動限界の考え方に水位差の影響を考慮する。
- ブロックに作用する力の釣り合いから転動限界条件を導く。
- ここでは、移動状態を滑動とし、抵抗力をブロック-底面間の摩擦力、作用外力を抗力とブロック前後の水位差により生じる静水圧の差を考える。

従来式(護岸の力学的設計法, 単体の式)
: ブロック必要重量と流速の関係

$$W > \alpha \left(\frac{\rho_w}{\rho_b - \rho_w} \right)^3 \frac{\rho_b}{g^2} U^6$$



W	: 物体重量
W_w	: 水中での物体重量
U	: ブロック近傍流速
ρ_b	: ブロックの密度
ρ_w	: 流体の密度
C_D	: 抗力係数
A_D	: 抗力作用面積
A_P	: 静水圧作用面積
ΔH	: ブロック前後の水位差
μ	: 摩擦係数
α	: 係数

水位差がブロック転動限界に及ぼす影響

ブロックが不動である条件は, $F_f > F_D + F_P$ であるから,

$$\mu(\rho_b - \rho_w)gV > \frac{1}{2}\rho_w C_D A_D U^2 + \rho_w g A_p \Delta H$$

ブロックの代表長さを L として, 以下の関係を導入する.

$$V = \alpha_V L^3, \quad A_D = \alpha_D L^2, \quad A_p = \alpha_p L^2, \quad \Delta H = -L \frac{dH}{dx}$$

各係数は, 実際の体積, 面積を代表長さで表すための係数. この関係より,

$$\mu(\rho_b - \rho_w)g\alpha_V L^3 > \frac{1}{2}\rho_w C_D \alpha_D L^2 U^2 - \rho_w g L^3 \alpha_p \frac{dH}{dx}$$

式を整理して,

$$\mu \frac{\rho_b - \rho_w}{\rho_w} g \alpha_V L > \frac{1}{2} C_D \alpha_D U^2 \left(1 - \frac{2}{C_D} \frac{\alpha_p}{\alpha_D} \frac{gL}{U^2} \frac{dH}{dx} \right)$$

$$\frac{gL}{U^2} = \frac{gh}{U^2} \frac{L}{h} = \frac{1}{F_r^2 k_h}$$

$$k_h = \frac{h}{L}$$

水深—ブロック高さ比

水位差がブロック転動限界に及ぼす影響

長さスケール L を消去するために、両辺を3乗して、 $W = \rho_b g a_v L^3$ の関係を使えば、

$$W > \frac{1}{8} \frac{C_D^3 \alpha_D^3}{\alpha_V^2 \mu^3} \left(\frac{\rho_w}{\rho_b - \rho_w} \right)^3 \frac{\rho_b}{g^2} U^6 \left(1 - \frac{2}{C_D k_h F_r^2} \frac{\alpha_p}{\alpha_D} \frac{dH}{dx} \right)^3$$

従来の式に相当する項

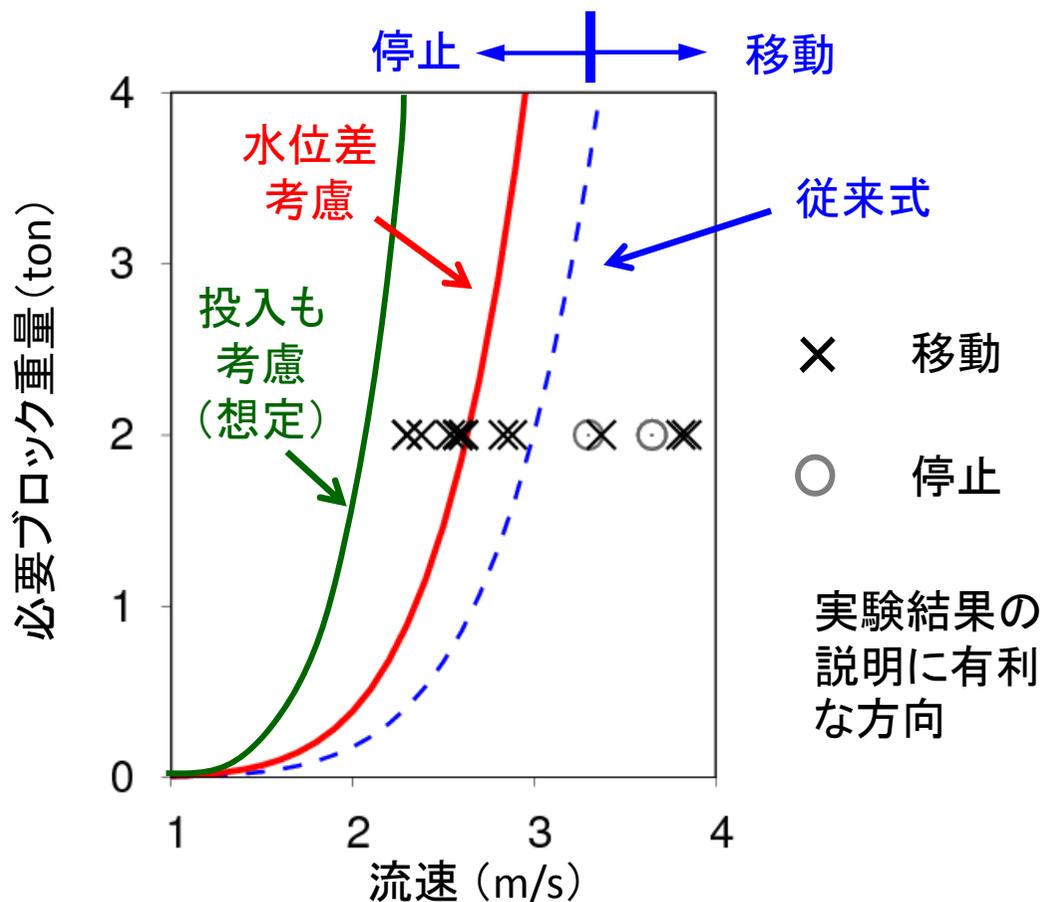
水位差がある場合の補正項

- フルード数が小さく、水深に比してブロック代表長さが大きい場合、従来考慮している流速による影響に対して相対的に水位差の影響が顕著になる。
- 投入の影響を考慮すれば、移動開始流速はより低下すると考えられる。



H26 千代田実験水路による抑制工実験

$Fr=0.76, k_h=1.75, dH/dx=-0.27$



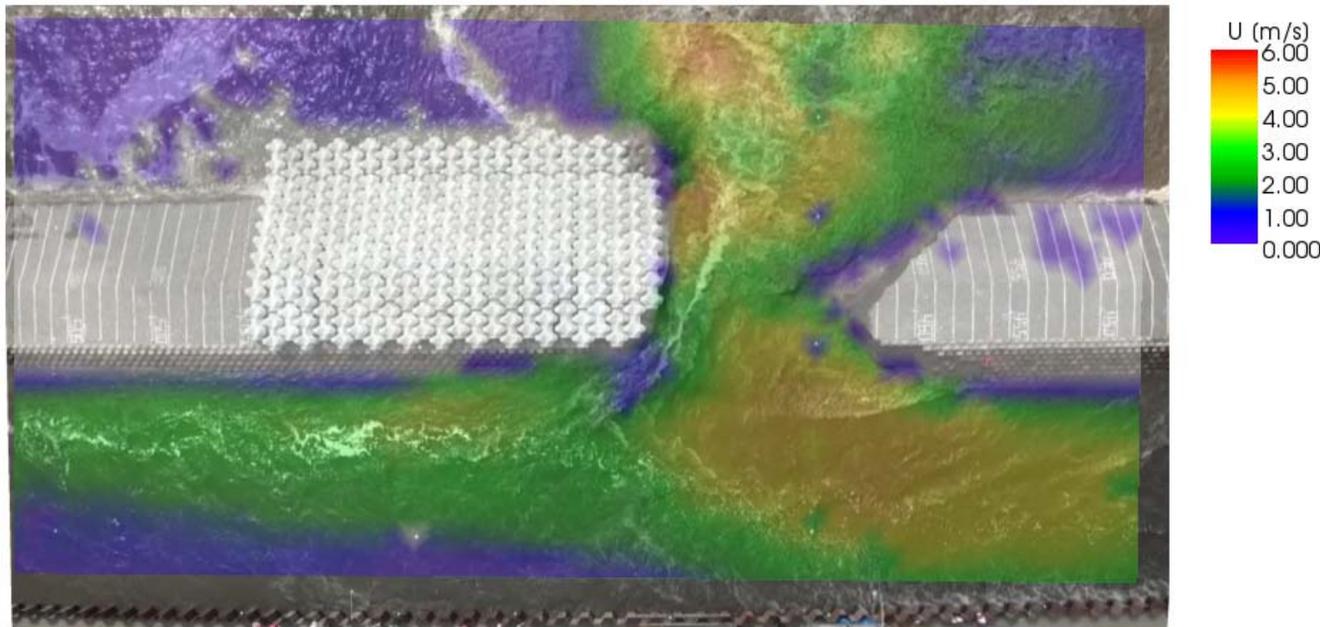
ブロック投入可能範囲

ブロック投入判定は流速だけでは行えないと考えられる。

ブロック移動条件 $\neq f(\text{流速})$
 $= f(\text{流速}, \text{水面勾配}, \text{投入}, \dots)$

$$\text{移動係数} = \frac{\text{移動させる力}}{\text{抵抗する力}} \times \text{投入など不確実性を示す係数 (>1)}$$

<1 投入できる可能性
>1 別途ブロックを留まらせる対策が必要



- 移動判定条件を実験より提案し、数値計算 (Nays2D Breach)、現地観測結果から、移動係数を計算。
- ブロック移動メカニズムの把握や投入可能位置の判断の目安に使用。

ブロック沈下実験

- 寒地土木研究所 高速循環水路（平坦床，水路幅1m）
- 河床材料粒径，1.2mm 断面平均流速，0.68m/s程度
- 千代田実験水路を想定した1/10縮尺模型
- トラスフット（縦置き，横置き），平型ブロック，袋詰め根固めを底面に置き，ブロックの沈下過程，ブロック周辺の洗掘特性を把握する。



トラスフット横置きの場合

ブロック沈下実験



トラスフット縦置き



袋詰め根固め

ブロック	洗掘量 (cm)	ブロック高さ (cm)
トラスフット横	7	11.4
トラスフット縦	6.6	11.4
平型ブロック	5.6	5.5
袋詰め根固め	5.4	4

洗掘量(沈下量)は、ブロック高さの半分～1.5倍程度.

締め切り実験

- 国土技術政策総合研究所 共同水理実験棟 可傾斜水路
- H27千代田実験水路締め切り実験の1/20縮尺を想定 →
- 水路幅 0.5m, 勾配 1/500, 粒径 0.5mm
- ブロックを40秒間隔で投入 (現地換算で3分間隔)



トラスフット

平型ブロック

袋詰め根固め

ブロック投入順序を変更して締め切り効果を検討

1段目

2段目以降

トラスフット

→

トラスフット

平型ブロック

→

トラスフット

袋詰め根固め

→

トラスフット



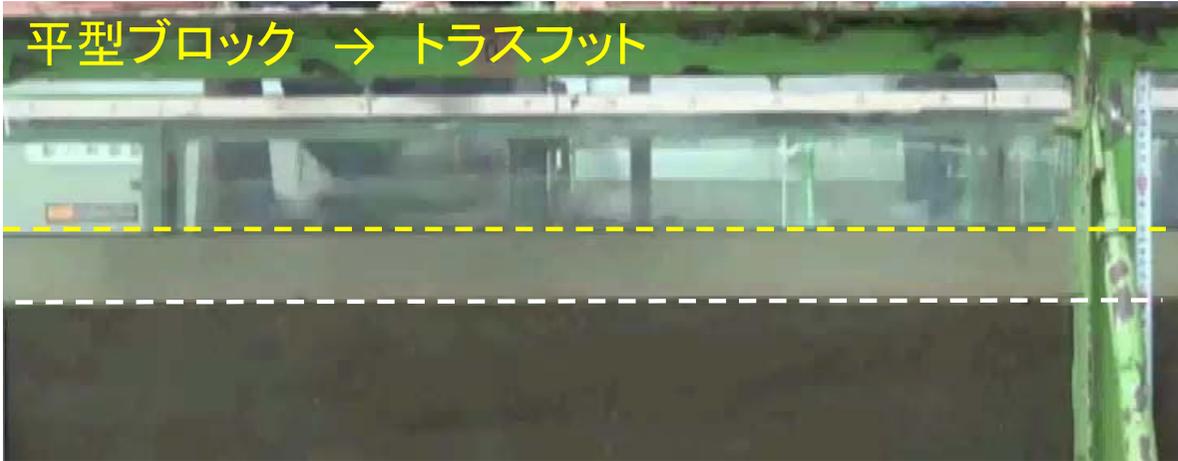
※袋詰め根固めの構成材料は最大粒径が19mm, 現地換算で38cm程度のもを使用

締め切り実験

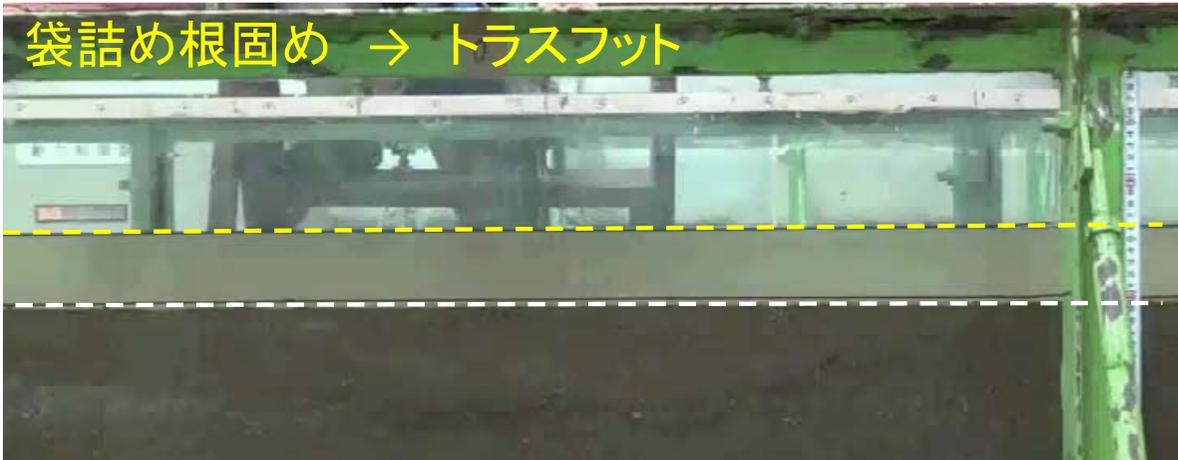
トラスフット → トラスフット



平型ブロック → トラスフット



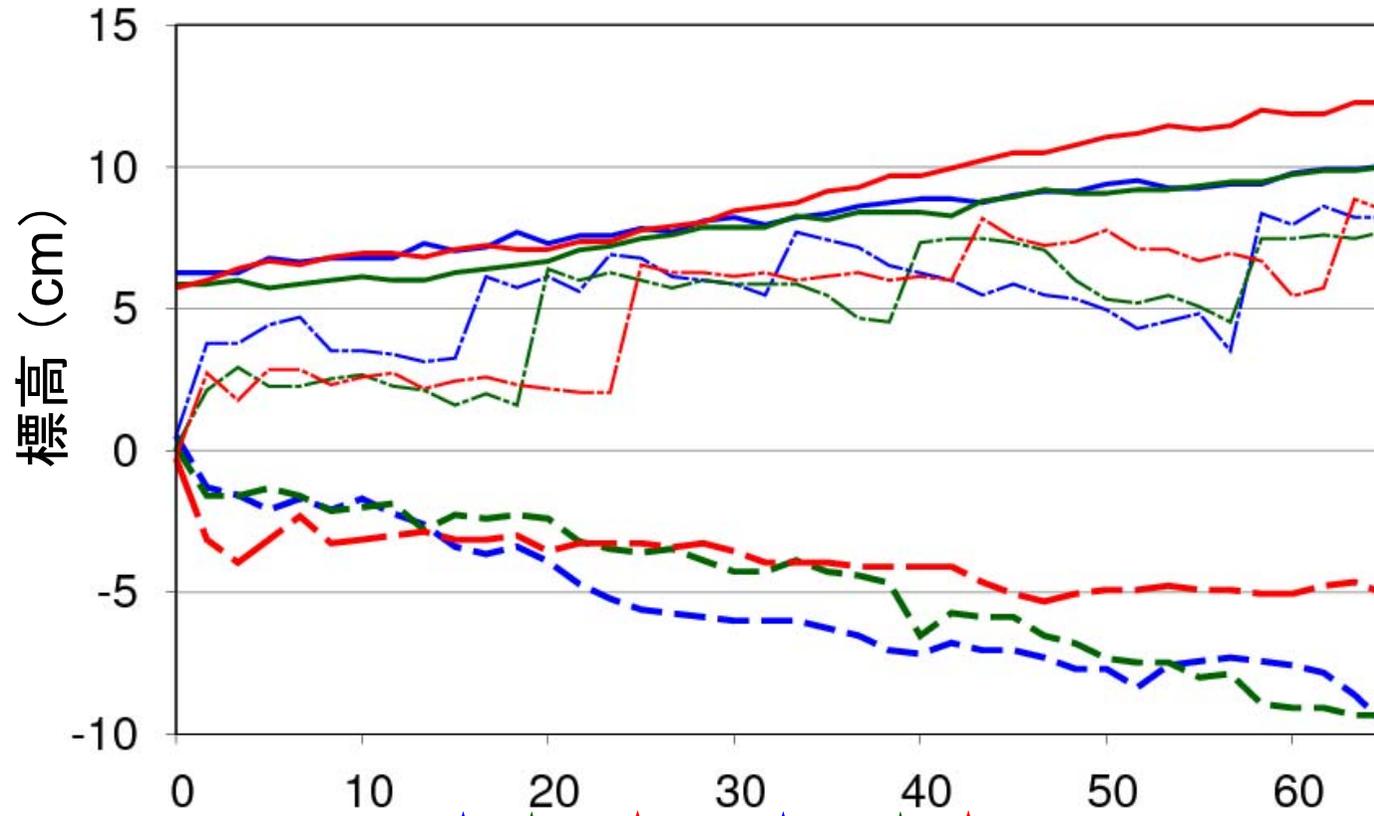
袋詰め根固め → トラスフット



- 締め切り初期では、トラスフットでは、脚の間に生じる局所流で土砂が動き、沈下しやすい。平ブロックや袋詰め根固めにおいても同様に沈下するが、沈下量としては小さい。
- 締め切りが進むと、上流側の水位が上昇することで、ブロック域には急な水面勾配がつき、ブロックの下からより土砂が抜け出しやすくなる。
- また、水位上昇により上流側の流砂量が減少する。
- 結果として、トラスフットのみの場合、平ブロックを使った場合の最終的な洗掘深さは同程度であった。
- 一方、袋詰め根固めを使った場合、河床の洗掘とともに袋詰め根固めも変形するため、砂の抜けだしを防ぎ、最終的な洗掘深は最も小さく、上流側の水位が高くなった。

白破線：初期河床
黄破線：初期水位

締め切り実験



実線: ブロックの上流側水位
 破線: ブロック域の最大洗掘深
 一点鎖線: ブロック積み上げ高さ
 ※いずれも水路右壁沿の値

青: トラスフット⇒トラスフット

緑: 平型ブロック⇒トラスフット

赤: 袋詰め根固め⇒トラスフット

時間 (分)

↑
 トラスフット
 2段目へ

↑
 平型ブロック
 ⇒トラスフット

↑
 袋詰め⇒トラスフット

↑
 トラスフット
 3段目へ

↑
 トラスフット
 2段目へ

↑
 トラスフット2段目へ

※それぞれのブロック形状が異なるため、2, 3段目に移行する時間は若干異なる。

- 初期(ブロック1段目)の洗掘傾向は各ケースで似ている。
- ブロックの積み上げが2段目以降になると、水位が上昇するとともに洗掘も進む傾向。

平成28年8月17日からの大雨による緊急復旧工事について

北海道開発局

緊急復旧工事(堤防決壊箇所における緊急復旧工事(台風第7、11、9、10号関連))

・堤防が決壊した常呂川水系柴山沢川、石狩川水系空知川、十勝川水系札内川、音更川の6箇所にて緊急復旧工事を実施し、全て完了。

石狩川支川 空知川

決壊箇所

空知川KP116.2左岸(L=150m)、KP117.0左岸(L=300m)の堤防が決壊
8月31日に緊急復旧工事に着手し、9月6日に完了

ところ しばやまざわ
常呂川水系 柴山沢川

柴山沢川の堤防が決壊(L=約100m)
8月22日に緊急復旧工事に着手し、8月26日に完了

**南富良野町長による
復旧状況確認(空知川)**

おとふけ
十勝川水系 音更川

音更川KP21.2左岸の堤防が決壊(L=200m)
8月31日に緊急復旧工事に着手し、9月5日に完了

さつない
十勝川水系 札内川

KP25.0左岸 戸簗別川
札内川

KP40.5左岸 決壊箇所
札内川

札内川

札内川

札内川KP25.0左岸(L=200m)およびKP40.5左岸(L=200m)の堤防が決壊
KP25.0左岸は8月31日に緊急復旧工事に着手し、9月7日に完了、KP40.5左岸は9月1日に緊急復旧工事に着手し、9月7日に完了

24時間体制で緊急復旧工事を実施

常呂川支川柴山沢川の被災状況

■常呂川支流の柴山沢川の一部区間で堤防が決壊し、常呂川本川の堤防との間の約40ha が浸水した。



柴山沢川決壊箇所位置図

平成28年8月25日 10:10
国土地理院撮影



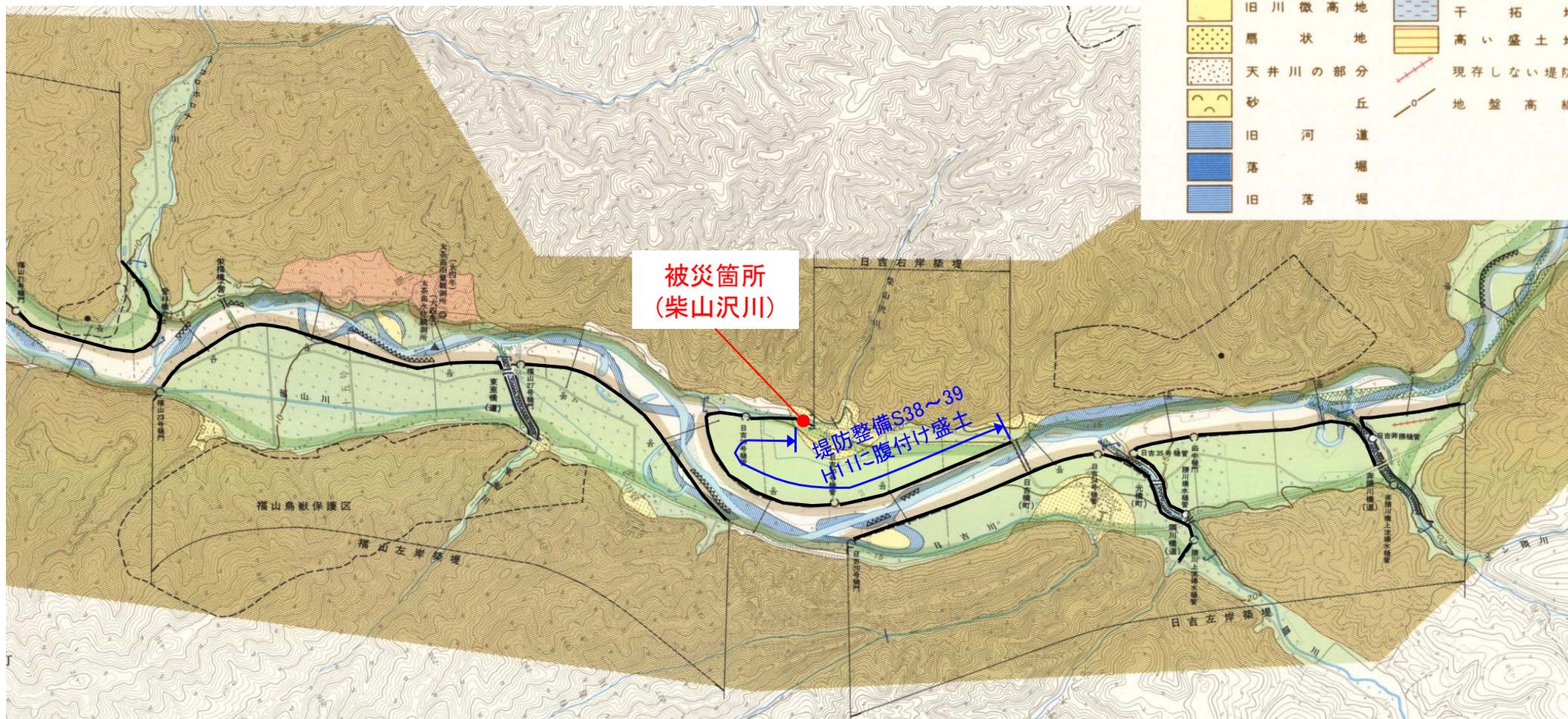
柴山沢川決壊状況

常呂川支川柴山沢川の被災箇所

- 治水地形分類図によると柴山沢川は扇状地に分類される。
- 柴山沢川の堤防は昭和38～39年に整備され、その後平成11年度に腹付け盛土(かさ上げ含む)を整備している。

治水地形分類

	山地・丘陵地		氾濫平野
	台地		湿地
	自然堤防		旧湿地
	旧川微高地		干拓地
	扇状地		高い盛土地
	天井川の部分		現存しない堤防
	砂丘		地盤高線
	旧河道		
	落堀		
	旧落堀		



常呂川支川柴山沢川の緊急復旧工事

8月22日 9:30 緊急復旧工事着手。
8月26日 12:00 緊急復旧工事完了。

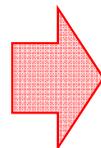


工事状況(24時間体制による緊急復旧)



8月23日(火)19:40 緊急復旧工事着手。

8月29日(月)15:00 緊急復旧工事完了。



工事状況(24時間体制による緊急復旧)



美瑛川支川辺別川KP7.2付近右岸(旭川市西神楽1線26号地先)の緊急復旧工事

8月24日(水) 16:40 緊急復旧工事着手。
8月30日(火) 12:30 緊急復旧工事完了。



工事状況(24時間体制による緊急復旧)



空知川左岸幾寅築堤 緊急復旧工事実施内容

平成28年9月6日 8時00分に緊急復旧工事を完了しました。

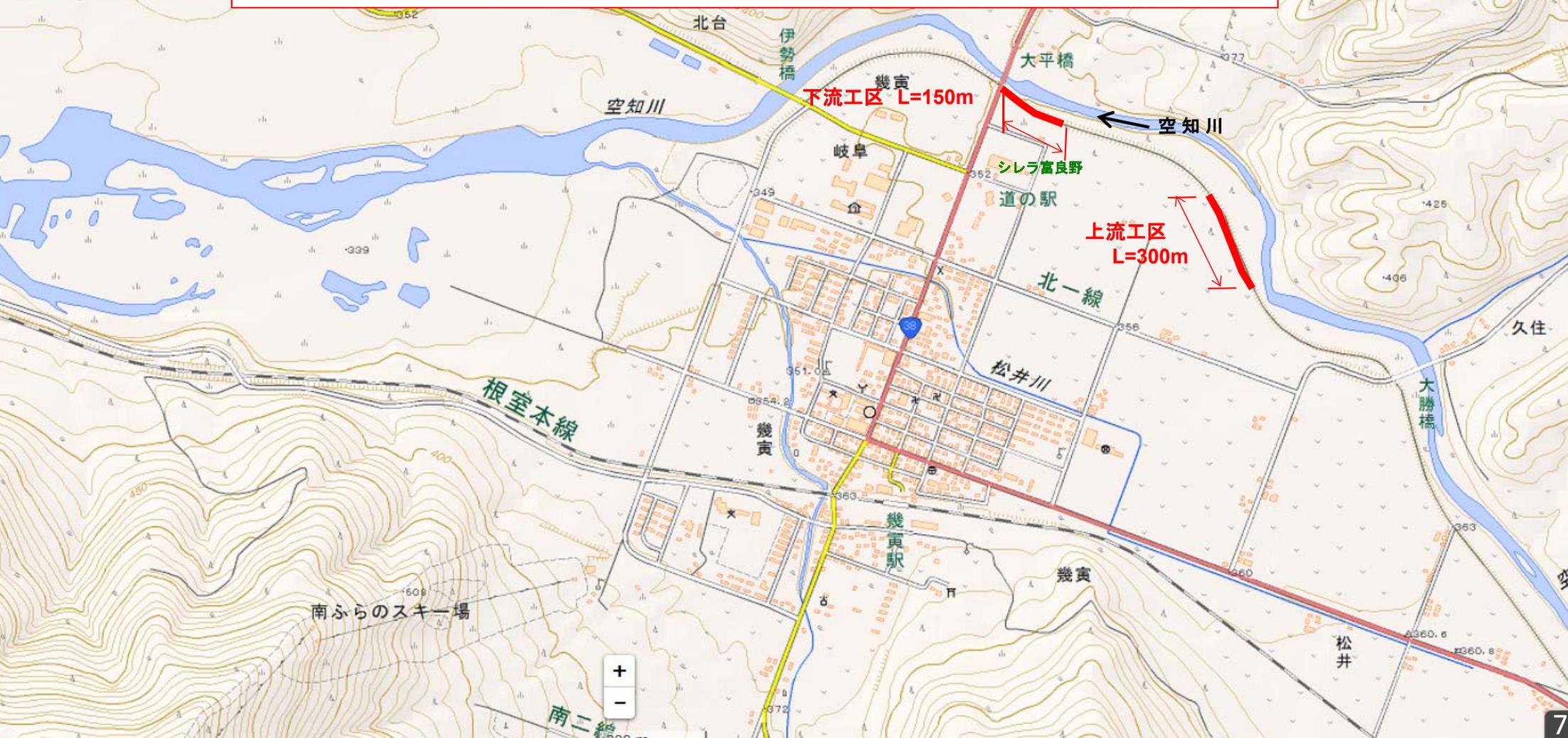
石狩川流域



<緊急復旧工事状況・経過>

- 決壊した堤防について、8月31日より24時間体制で緊急復旧工事を実施。
- 9月 1日 7時頃より、仮設道路開始
- 9月 1日 18時頃より、盛土を開始
- 9月 4日 15時頃より、根固めブロック設置開始
- 9月 6日 8時頃に、緊急復旧工事完了

:緊急復旧工事箇所



石狩川水系 空知川



石狩川水系 空知川



空知川左岸幾寅築堤 緊急復旧工事実施状況



協定業者による緊急復旧施工状況



防災エキスパートによる指導・監督



南富良野町長と空知川河川事務所長による合同現地確認



照明車を利用し24時間工事を実施

空知川左岸幾寅築堤 被災概要（上流決壊箇所）



決壊後の氾濫流の拡散状況
(8/31 16時頃撮影)

- ・大勝橋下流左岸で約300mにわたり決壊した。氾濫流は農地部に広く拡散し、南富良野町市街地に向かい流下した。
- ・出水後の氾濫原には、流路の跡とともに、大量の流木が散乱していた。



音更川の被災状況

- 音更川KP21.2左岸で河岸侵食が発生し、約230mにわたり決壊した。
- 決壊前の流路は堤防に対して十分な距離(約120m)があったが、出水により蛇行部が堤防まで到達した。



決壊前の状況



決壊箇所の状況



決壊後の状況

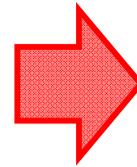


決壊箇所の状況(拡大)

出典：2016年8月北海道豪雨災害調査団 速報版第1報 2016年9月12日 ver.

音更川(KP21.2左岸付近) 緊急復旧工事

8月31日(水)19:00緊急復旧工事着手。
9月 5日(月)17:00緊急復旧工事完了。



工事状況(24時間体制による緊急復旧)



札内川の被災状況(KP25.0左岸)

- 札内川KP25.0左岸では約200mにわたり堤防が決壊した。戸蔦別川からの氾濫流は、決壊箇所から堤外へ流下した。
- 家屋や倉庫、民間発電事業者のソーラー発電施設が被災した。
- 戸蔦別川決壊前には、内水による浸水があり帯広市により内水排除作業が行われていた。



決壊前の状況



決壊箇所の状況



決壊後の状況



氾濫流の流下による堤内側の洗掘状況



戸蔦別樋門 被災状況



家屋等の被災状況

札内川の被災状況(KP40.5左岸)

- 札内川KP40.5左岸で河岸侵食が発生し、約130mにわたり決壊した。
- もともと左岸寄りに流路が形成されていたが、出水により蛇行部が堤防まで到達した。



決壊前の状況



決壊箇所の状況



決壊後の状況



決壊箇所の状況(拡大)

札内川(KP25.0左岸付近) 緊急復旧工事

8月31日(水)14:30緊急復旧工事着手。
9月 7日(水)24:00緊急復旧工事完了。



工事状況(24時間体制による緊急復旧)

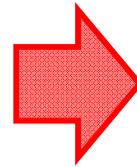


札内川(KP40.5左岸付近) 緊急復旧工事

9月1日(木)17:00緊急復旧工事着手。
9月7日(水)24:00緊急復旧工事完了。



9月1日(木)17:00頃



工事状況(24時間体制による緊急復旧)



9月4日(日)8:00頃



9月5日(月)12:00頃



9月5日(月)21:00頃 17

2017/03/27

平成28年度 第11回十勝川千代田実験水路等アドバイザー委員会

資料4

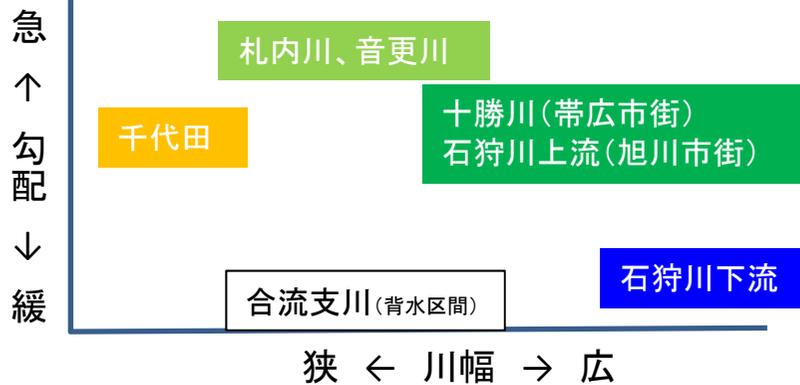
平成29年度の取組について

国土交通省 北海道開発局
(国研)土木研究所 寒地土木研究所

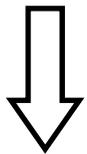
検討の状況とH29年度への取り組み

破堤現象（対策工実施のための条件）の理解

- ① 模型、数値解析により、千代田実験水路の知見の位置づけ、河道条件などによる破堤現象の違いを理解



- ② 数値解析による現象の想定(主に急勾配、砂質土の堤防)



【その他の現象への影響要因】
高水敷、ハイドロ、堤防断面 など

破堤の特徴(進捗方向など)、決壊口拡幅速度、流速

破堤対策工法の検討

締め切り手順

手順よりも施工速度が被害軽減に大きく影響

使用資材

転動、沈下

投入ブロックの適否判定、対策の提案
締め切り実験による効果の検証

使用機械・工法

H28の災害対応での課題・制約

施工ヤード(運搬機械の進入・回転・入替など)

施工機械(バックホウ等準備が容易で、施工性が高い機械が有効)

汎用機械による施工速度(ブロック投入速度)の向上を図る工法の実証

破堤現象に応じた破堤対策工法適用性の実証

決壊時の対策工法の施工要領(案)の提案

- ・河道特性等に応じた決壊現象に対応した抑制工、締め切りの適用条件の整理・例示
- ・施工のための推奨機材の選定を含む施工サイクルの例示 など

抑制工の施工条件

ブロックの据え付け状況



作業工程

- ・玉掛け
- ・吊り上げ
- ・据え付け
- ・玉外し



H28常呂川での対応



H28音更川での対応



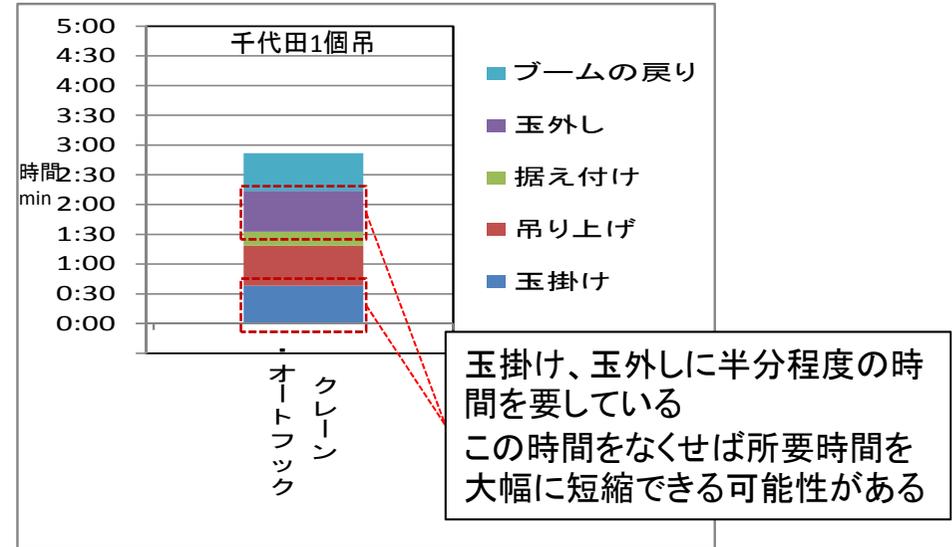
迅速な機材確保を考慮し、汎用性の高い機材による施工の実証が必要

ブロックの投入時間の短縮等について

抑制工の効果的な施工のためには施工速度の向上が必要

ブロック投入時の所要時間検討

千代田実験水路ではブロックを2個吊りして、作業時間を1/2とする対応についても検証している。

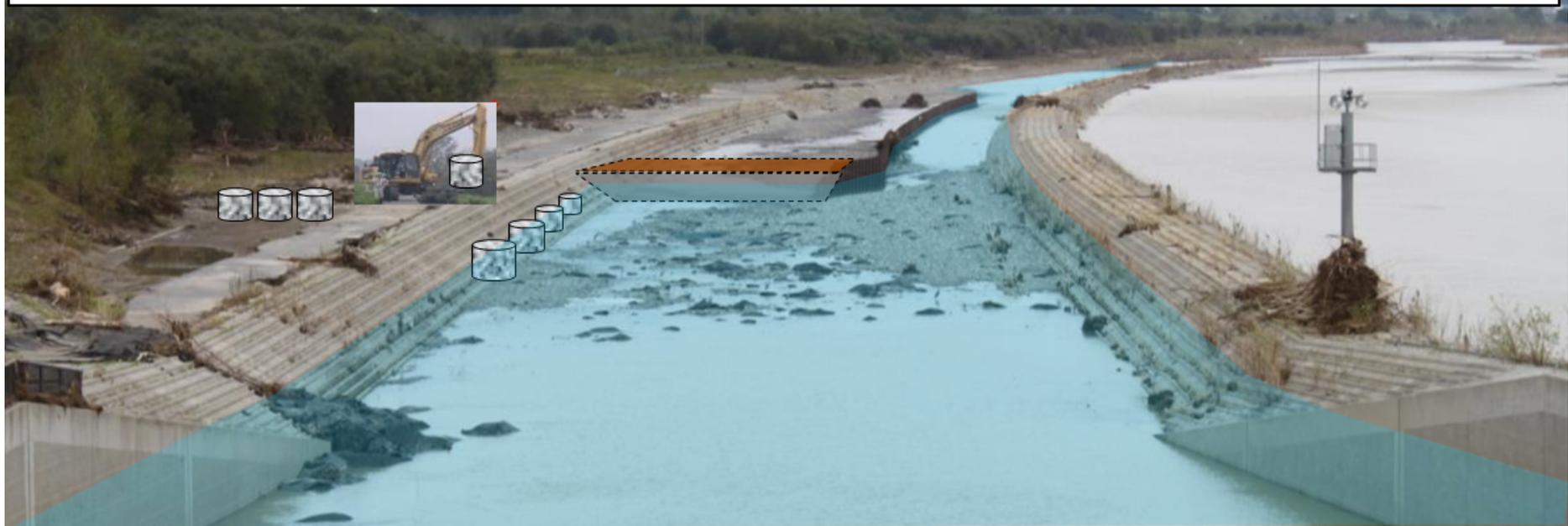


その他既存重機を使ったブロックの施工法の例 (H24北陸地整)



平成29年度の実証実験

バックホウ等を用いた効果的な施工方法の検証



【試行機材(例)】

バックホウ吊り上げ

バックホウ+掴み機

不整地運搬車(クローラー、荷台運転席回転) など