第Ⅲ部　縮尺模型実験による再現性の検証

第Ⅲ部では，縮尺模型実験による千代田実験水路における越水破堤実験の再現性の検証について述べる．

第9章　縮尺模型実験

千代田実験水路で実験を行うにあたり，基本的な流況や破堤状況を確認する目的で，つくば市の国土交通省国土技術政策総合研究所にある河川水理実験施設において縮尺模型実験を実施している．ここでは，千代田実験水路で行った越水破堤実験と縮尺模型を比較することで，今回の実験における破堤状況に関する再現性を検証した．

(1) 縮尺模型実験概要

a) 水路形状・実験条件

縮尺模型規模は，**写真- 49**，**図- 117**，**図- 118** に示すように，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及び新水路合流部下流まで合計 84m 区間とし，実験水路と氾濫域は移動床とした．現地と縮尺模型のスケール換算にあたって，**表- 14** に示すようにフルードの相似則を適用した．ここで，実験水路と氾濫域に敷き均す河床材の粒径については，**図- 119** に示すように， 千代田実験水路の浮遊成分である 2.38mm 以下をカットした粒径加積曲線をフルード相似則に従い 1/20 にした粒径加積曲線になるような混合砂を用いた．

縮尺模型における堤体材料は，掃流力の相似性に着目した縮尺粒径を用いる手法 [24]もあるが，現地の堤体は，シルト分を 15％程度含んだ若干粘着性がある土質であるため，既往研究 [11]を参考にあらかじめ実施した実験結果より，河床材料にベントナイトを堤体の体積に対して 10％配合したものを使用する．

なお，現地で用いた鋼矢板については，縮尺模型においては凹凸状況を再現した木製で製作し，縮尺模型実験水路内の粗度係数はフルード相似則に合うように調整した．

表- 15 に実験ケースを示す．縮尺模型実験は現地（千代田実験水路）で行った実験条件と同じ条件を複数回実施した．なお，細粒分の多い堤体材料を用いた現地Case3については，土質の縮尺再現が困難であるため実験条件から外した．

b) 計測方法

主な観測項目・観測箇所は**図- 120** に示す通りである．

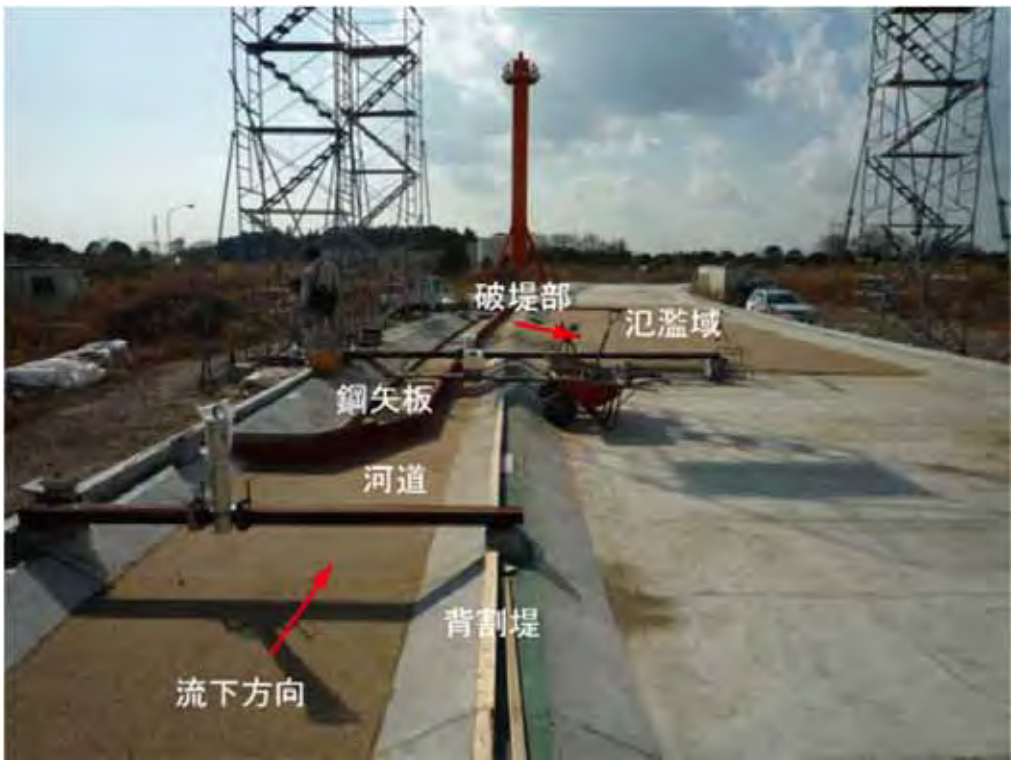


写真- 49　縮尺模型全景

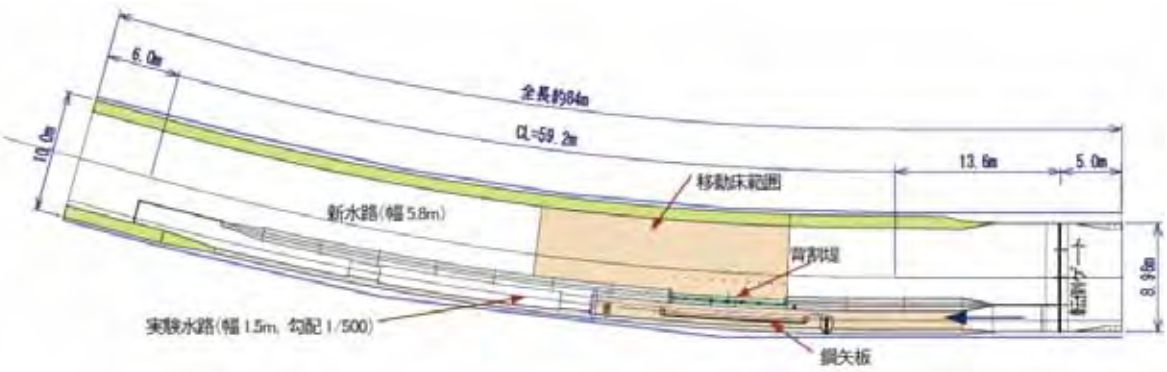


図- 117　縮尺模型平面図

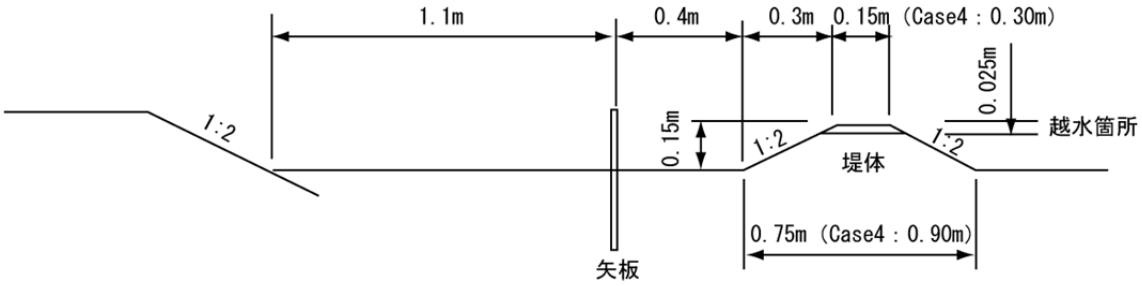


図- 118　縮尺模型断面図

表- 14　フルード相似則

物理量	千代田 実験水路	縮尺 (S=20)	縮尺模型	備考
全長 (m)	1680	1/S	84	※縮尺模型の実験で用いた浮遊分カット後の粒径は0.9mm
川幅 (m)	200	1/S	10	
河床材料d_{50}※ (mm)	11	1/S	0.55	
給水量 (m^3/s)	70	$1/S^{5/2}$	0.039	
河床粗度 (m)	0.023	$1/S^{1/6}$	0.014	
時間 (分)	100	$1/S^{1/2}$	22.36	

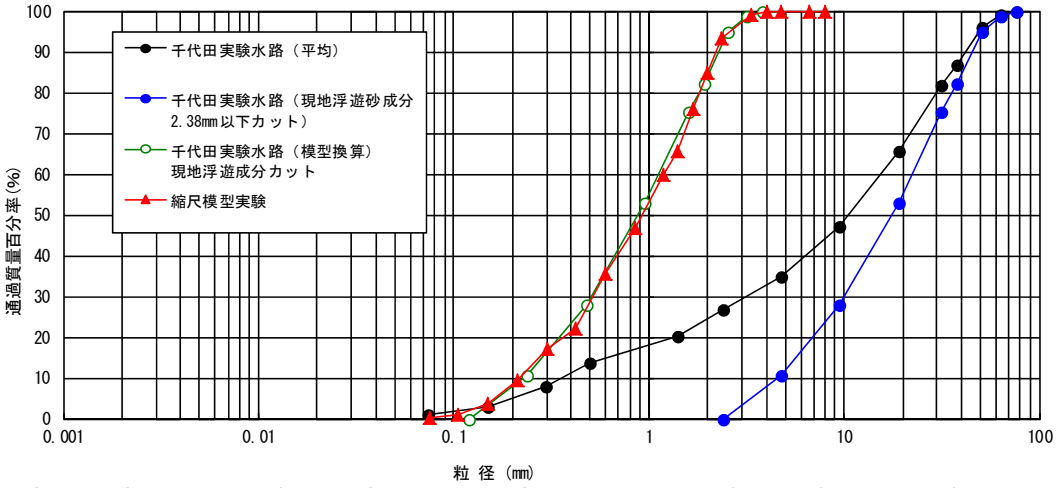
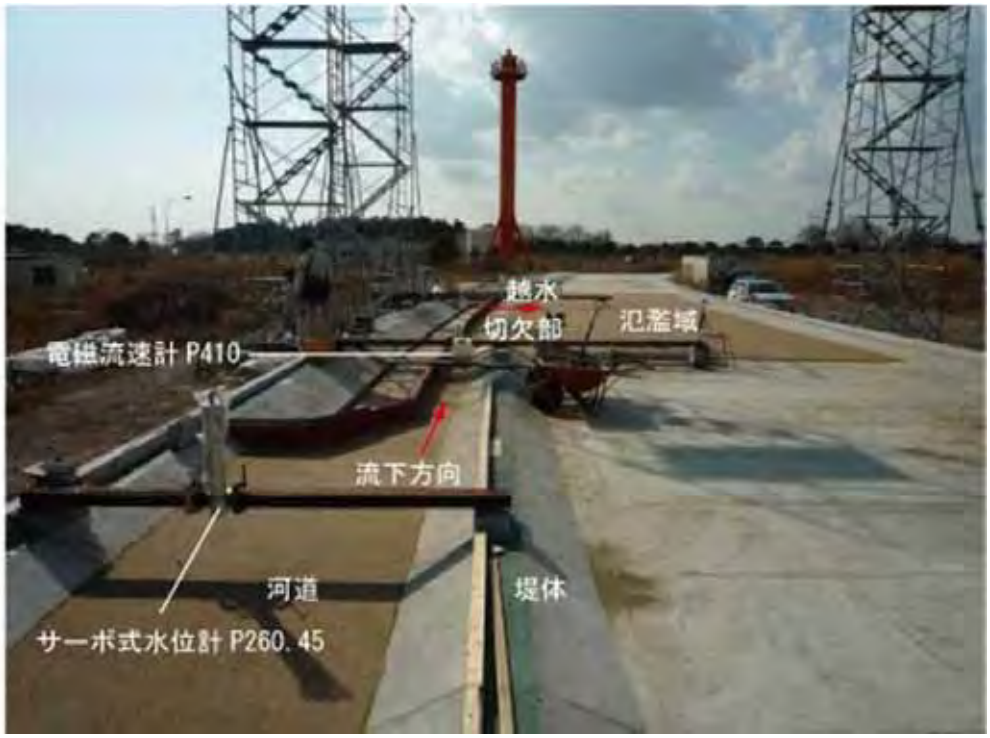


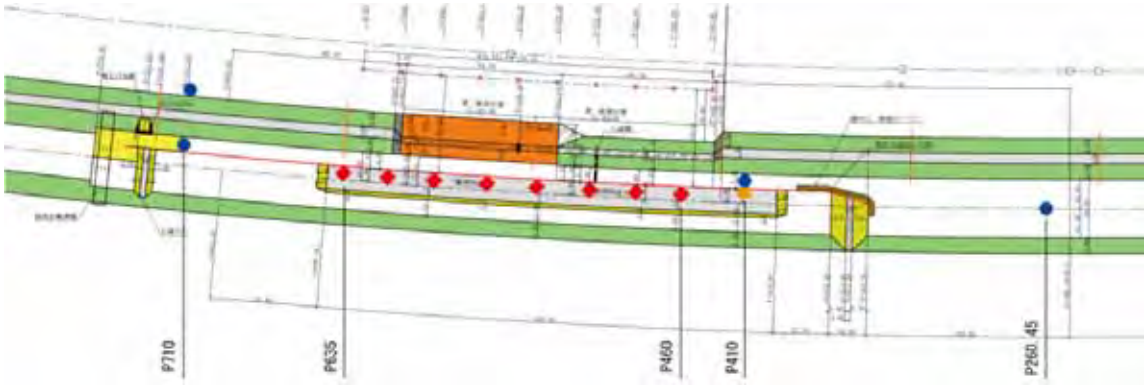
図- 119　河床材料の粒径加積曲線図

表- 15　実験条件

現地実験ケース	模型実験ケース	堤体・水路形状						備考
		高さ (m)	天端幅 (m)	法勾配	水路幅 (m)	水面勾配 (目標)	通水流量 (目標) (m^3/s)	
Case1	C1-1 C1-2 C1-3	0.15 (3)	0.15 (3)	1:2 (1:2)	0.4 (8)	1/500 (1/500)	0.039 (70)	
Case2	C2-1 C2-2	0.15 (3)	0.15 (3)	1:2 (1:2)	0.4 (8)	1/3500 (1/3500)	0.020 (35)	流量変化
Case4	C4-1 C4-2	0.15 (3)	0.3 (6)	1:2 (1:2)	0.4 (8)	1/500 (1/500)	0.039 (70)	天端幅変化

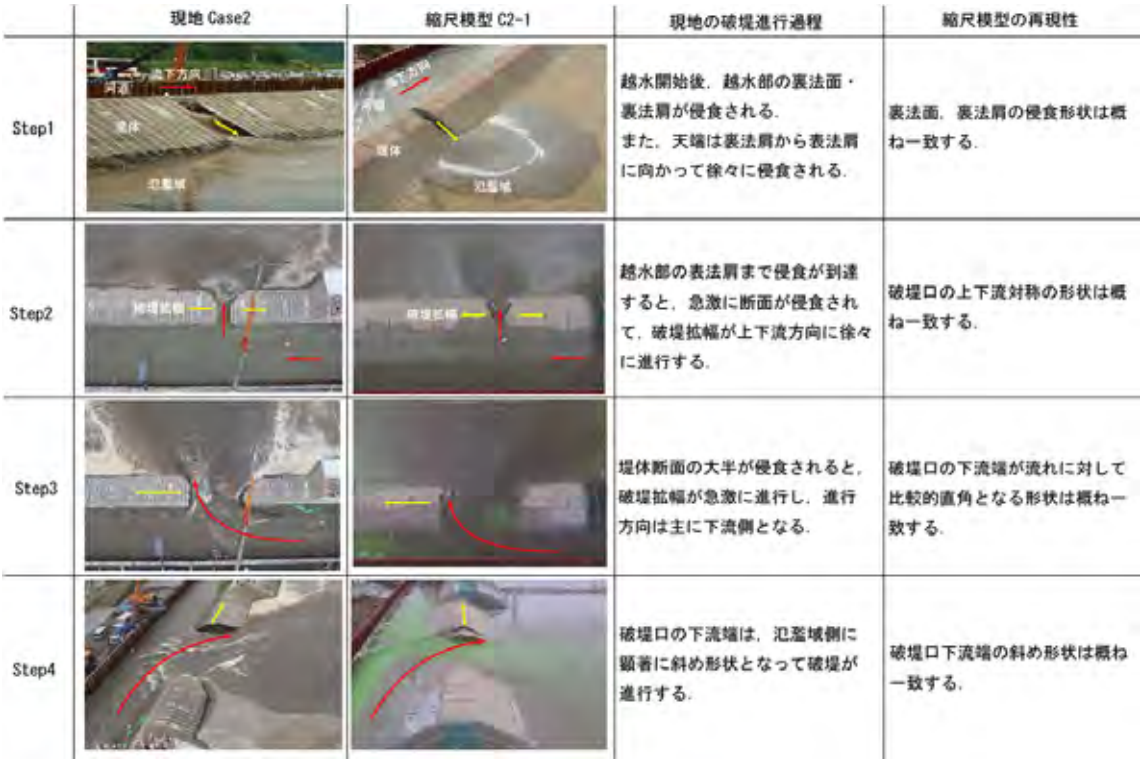
( ) は千代田実験水路の値





観測時期	観測項目	観測箇所・手法
通水中	水路内水位	●サーボ式水位計：4 基（1 分ピッチ）
		◆マノメーター（鋼矢板沿い）：6 点
	氾濫域水位	●サーボ式水位計：1 基（1 分ピッチ）
	流量観測	■電磁流速計（実験水路内切欠部より上流 50m）：1 基（1 分ピッチ）
		氾濫量（上流給水量−下流流量）は H-Q 式より算出
	流況観測	PIV による水面流況
	破堤形状	カメラ・ビデオ撮影
	実験状況	カメラ・ビデオ撮影
通水後	河床高	水平糸からの下がり量・局所洗掘はレベル測量（初期河床高からの変動量）
	破堤形状	カメラ・ビデオ撮影

図- 120　観測手法



	現地 Case2	縮尺模型 C2-1	現地の破堤進行過程	縮尺模型の再現性
Step1			越水開始後，越水部の裏法面・裏法肩が侵食される． また，天端は裏法肩から表法肩に向かって徐々に侵食される．	裏法面，裏法肩の侵食形状は概ね一致する．
Step2			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．	破堤口の上下流対称の形状は概ね一致する．
Step3			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．	破堤口の下流端が流れに対して比較的直角となる形状は概ね一致する．
Step4			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．	破堤口下流端の斜め形状は概ね一致する．

図- 121　現地（千代田実験水路）と縮尺模型の破堤状況の比較

(2) 再現性の検証

a) 破堤進行過程の再現性

図- 121 に示すように，縮尺模型における破堤進行過程についても，越水開始から破堤終了まで現地(千代田実験水路)と同様の 4 つのステップが観察された．以下に，Case2 を例に，縮尺模型実験の再現性について整理した．

Step1 は，越水開始後，越水部の裏法面･裏法肩が侵食される．また，天端は裏法肩から表法肩に向かって徐々に侵食される．現地と縮尺模型で，裏法面･裏法肩の侵食形状は概ね一致している．

Step2 は，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．現地と縮尺模型で，破堤口の上下流対称の形状は概ね一致している．

Step3 は，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．現地と縮尺模型で，破堤口下流端の堤体形状が流れに対して比較的直角となる形状は概ね一致している．

Step4 は，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．現地と縮尺模型で，破堤口下流端の斜め形状は概ね一致している．

写真- 50～写真- 56 に，各ケースの破堤状況について，現地と縮尺模型を同じ破堤幅で比較したものを示す．破堤進行に要する時間は異なるものの，現地と縮尺模型で，破堤進行過程は概ね一致することが確認できる．

写真- 50　破堤状況（模型 C1-1）

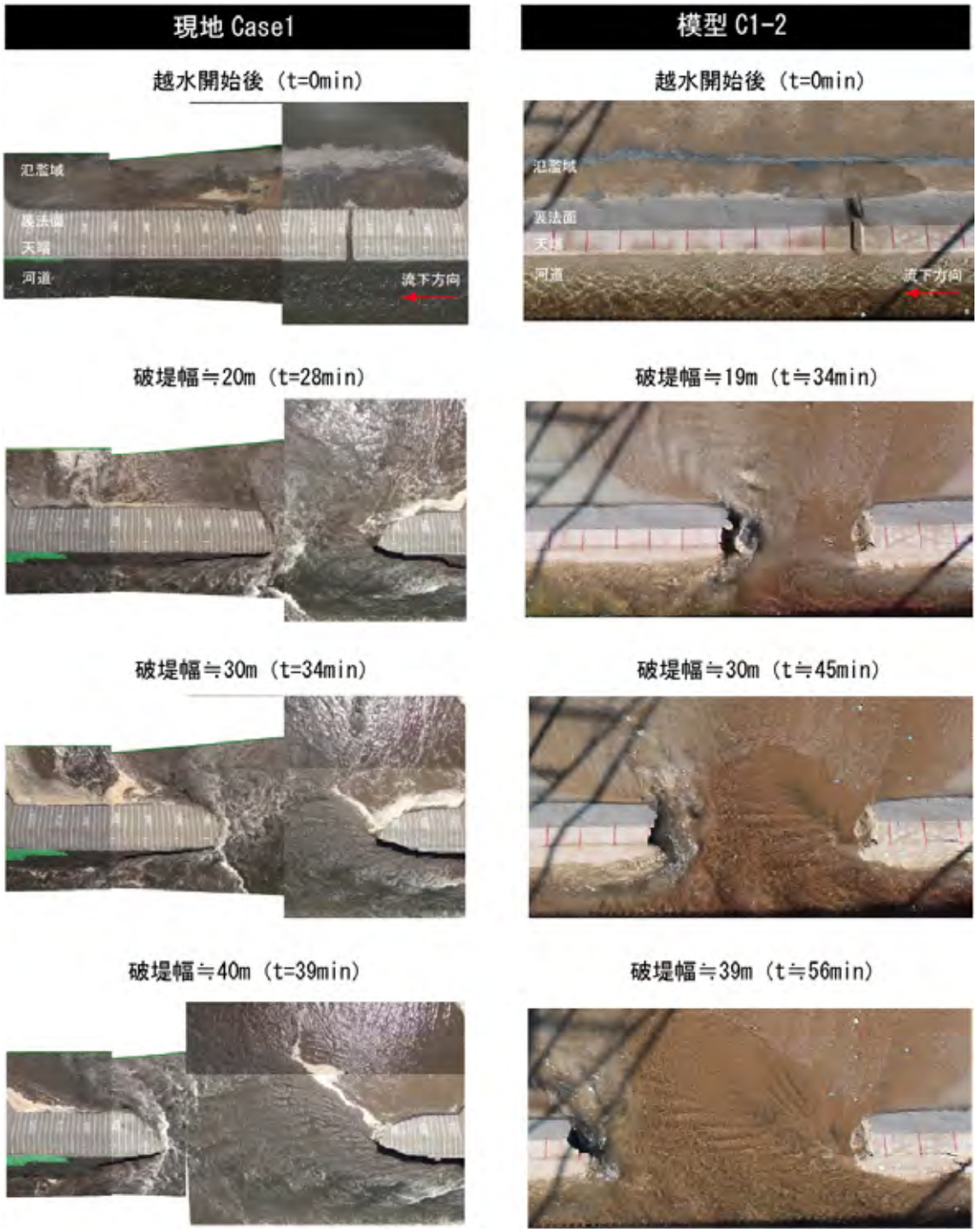


写真- 51　破堤状況（模型 C1-2）

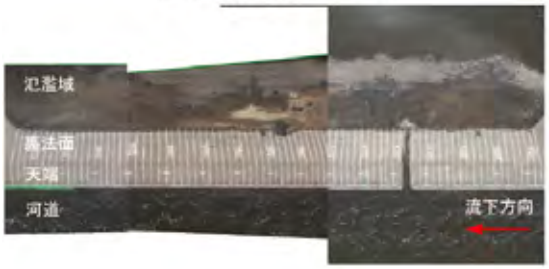
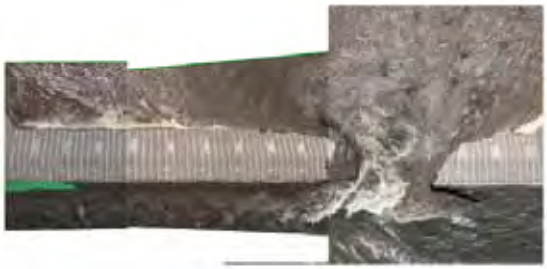
現地 Case1	模型 C1-3
越水開始後（t=0min）	越水開始後（t=0min）
	
破堤幅≒9m（t=6min）	破堤幅≒9m（t≒58min）
破堤幅≒12m（t=8min）	破堤幅≒12m（t≒63min）
	
破堤幅≒20m（t=28min）	破堤幅≒21m（t≒72min）
破堤幅≒52m（t=56min）	破堤幅≒54m（t≒105min）

写真- 52　破堤状況（模型 C1-3）

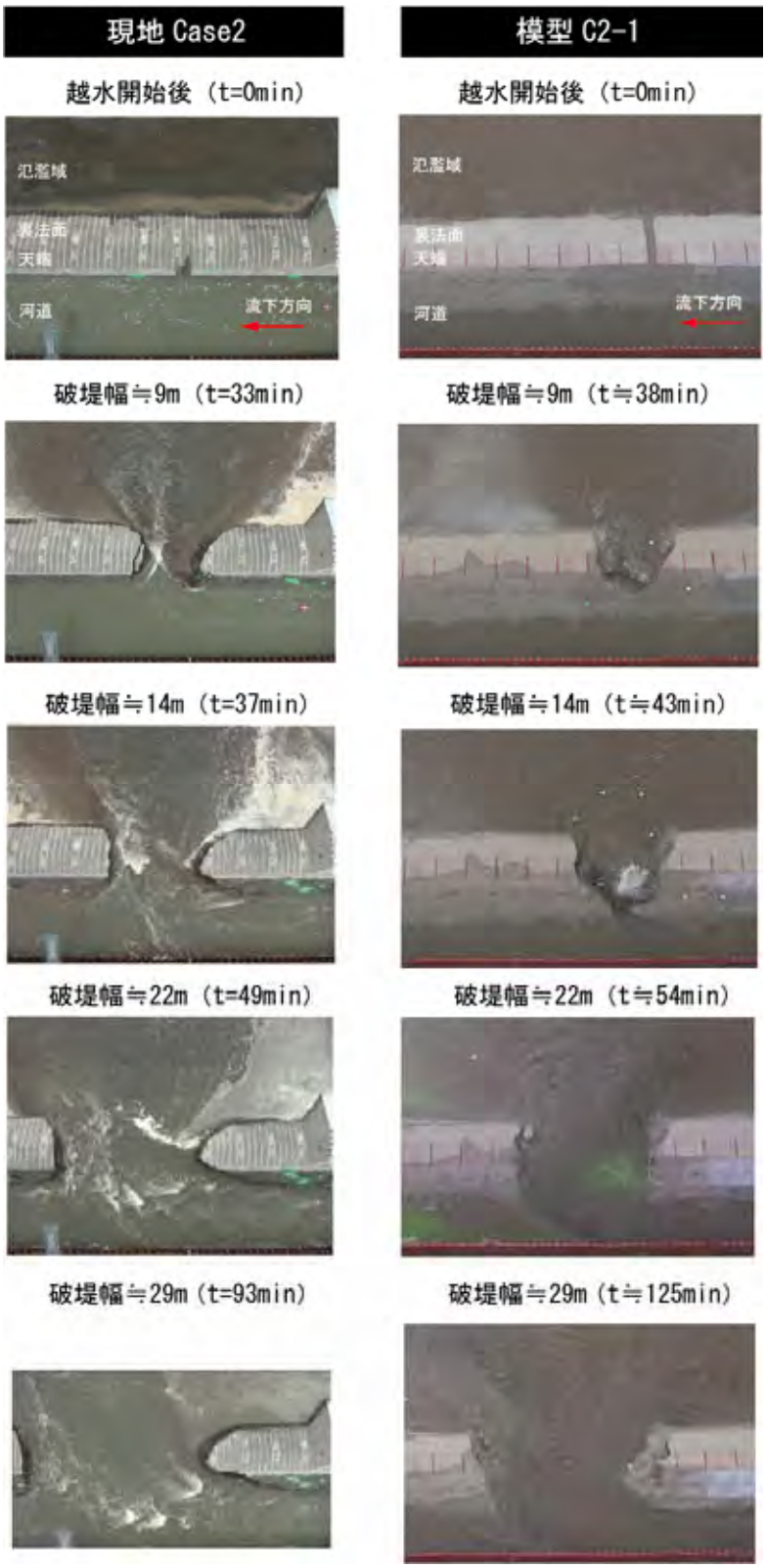


写真- 53　破堤状況（模型 C2-1）

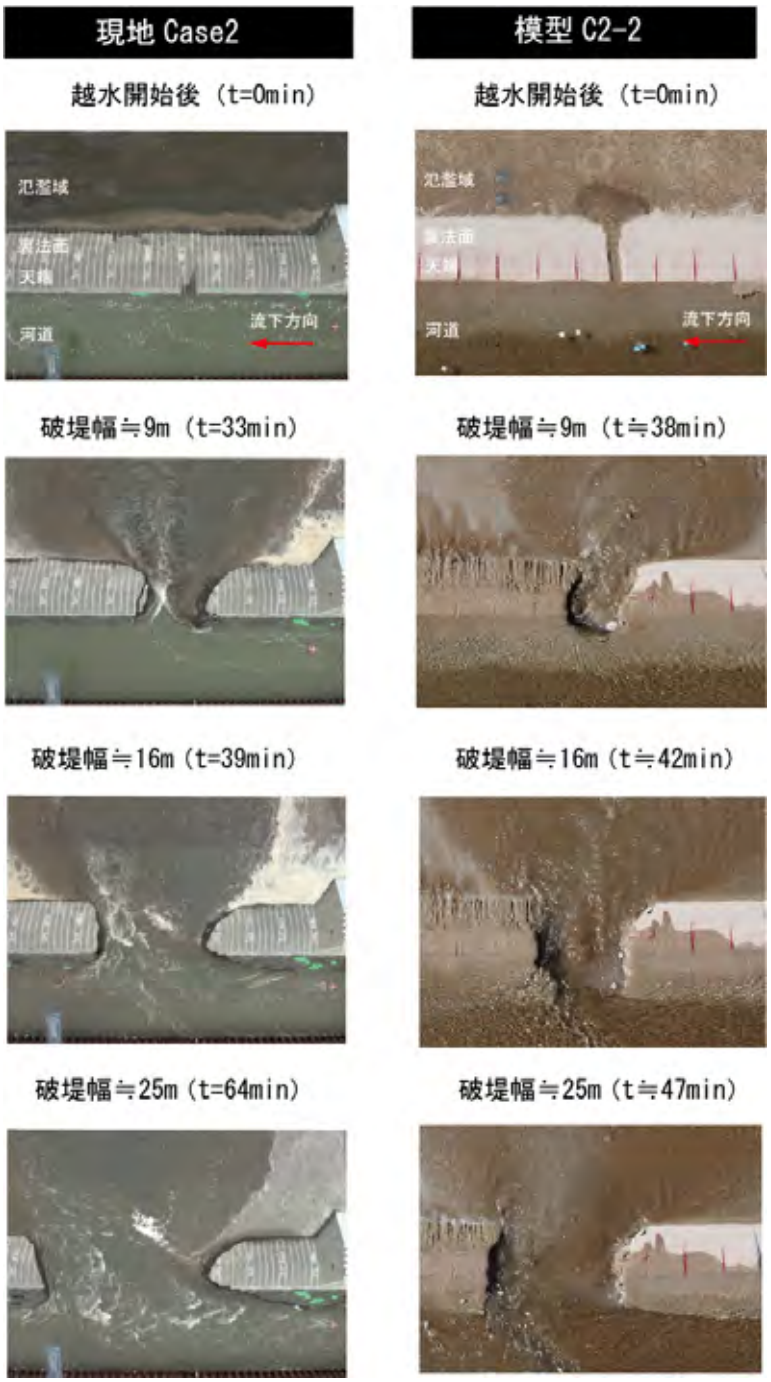


写真- 54　破堤状況（C2-2）

写真- 55　破堤状況（C4-1）

写真- 56　破堤状況（C4-2）

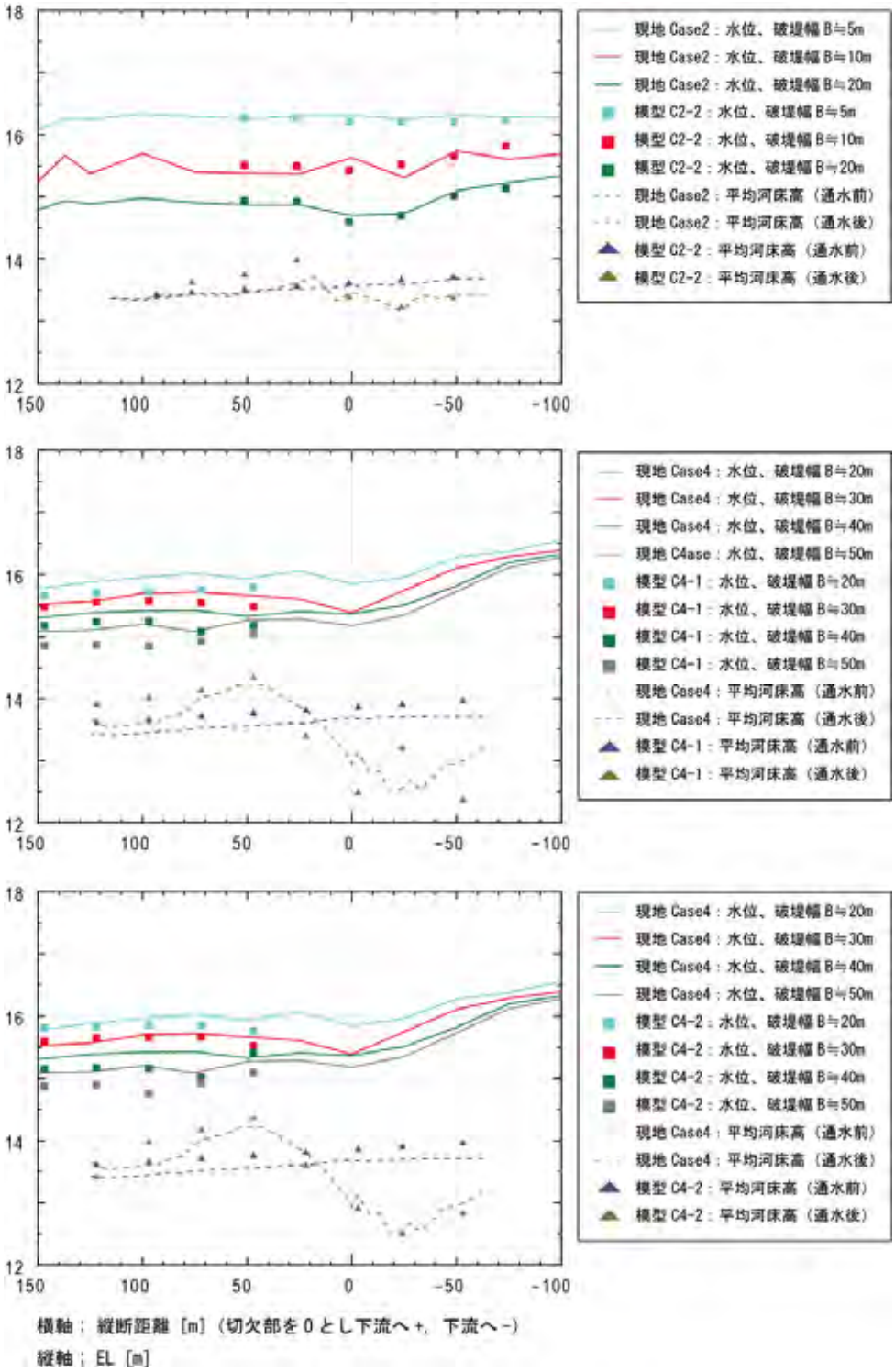


図- 122　通水前後の縦断形状と水位

b）水位と河床高の再現性

河道内の水位と河床高について，Case2 と Case4 を例に，現地と縮尺模型実験の結果を比較したものを図- 122 に示す．なお，縮尺模型実験の結果は現地スケールに換算してある．水位は概ね一致しており，平均河床高についても，C2-2 や C4-1 で最大 0．5m 程度のばらつきはあるものの，概ね傾向は一致している．

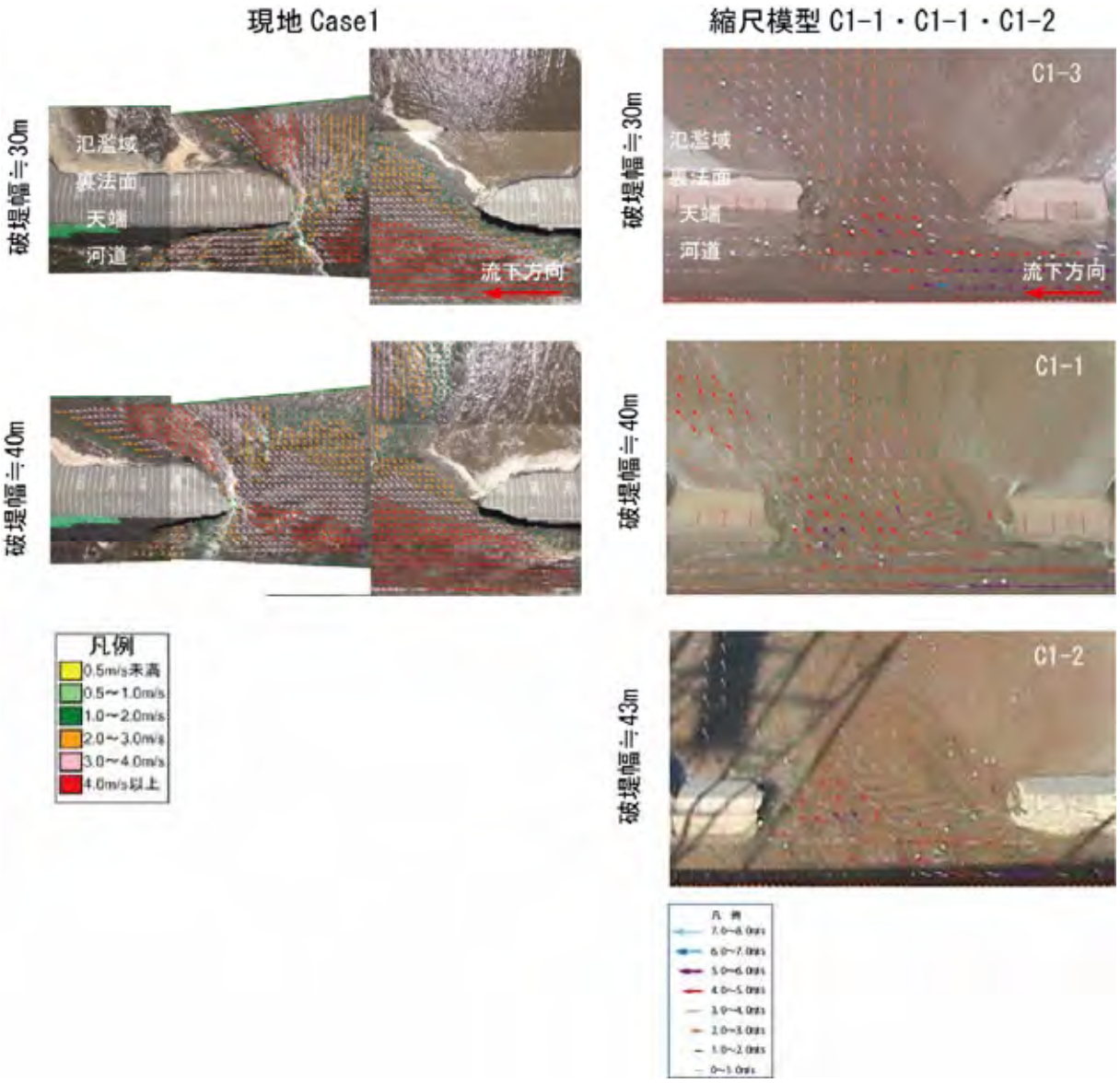


図- 123　PIV 解析結果（Case1）

c）流況の再現性

破堤時の表面流速の PIV 解析結果について，破堤幅が同じ時の現地と縮尺模型実験の比較を図- 123～図- 125 に示す．なお，縮尺模型の値をフルード相似則により現地スケールに換算している．

破堤口における流速及び流向は，各ケースとも概ね傾向は一致していることが確認できる．

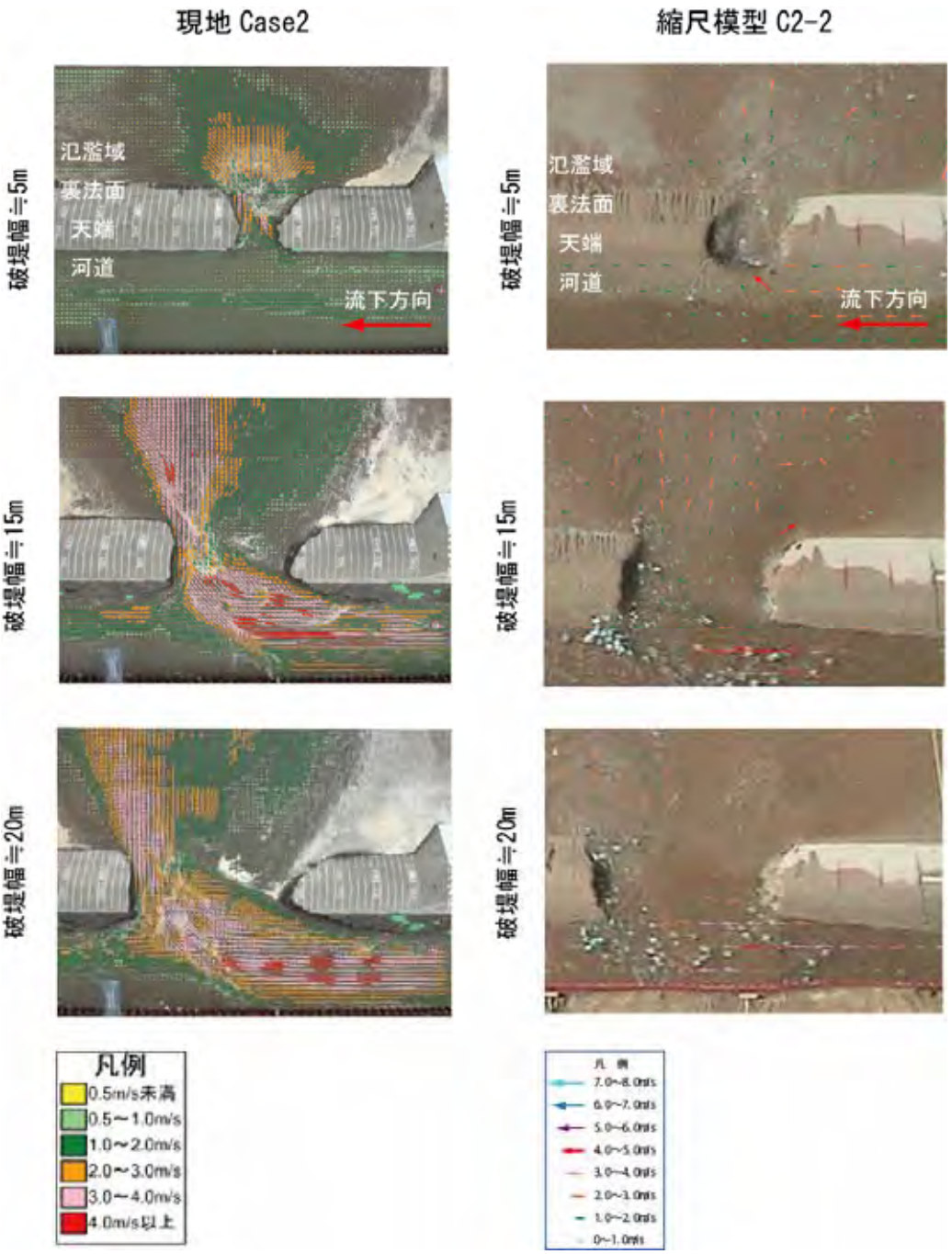


図- 124　PIV 解析結果（Case2）

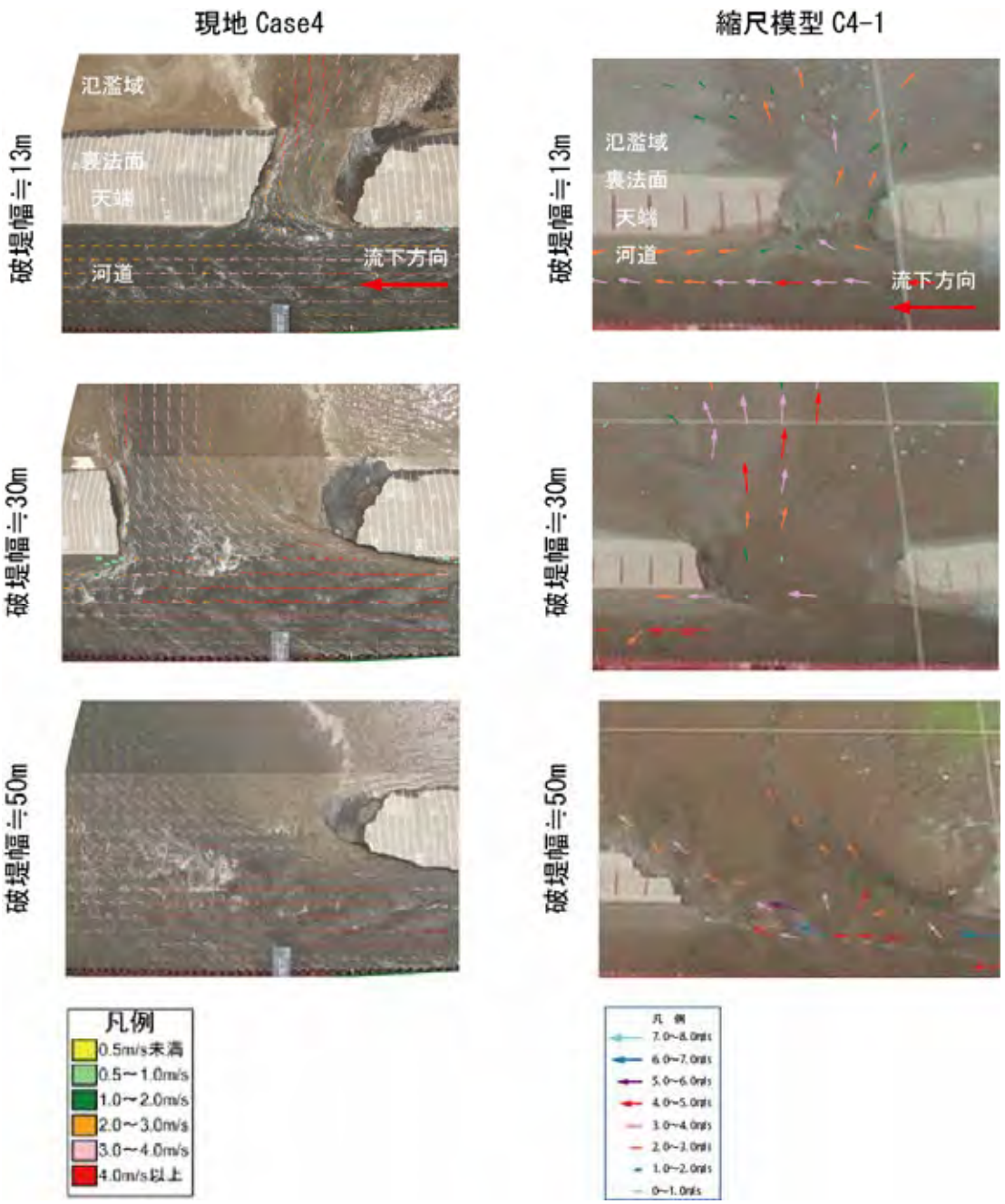


図- 125　PIV 解析結果（Case4）

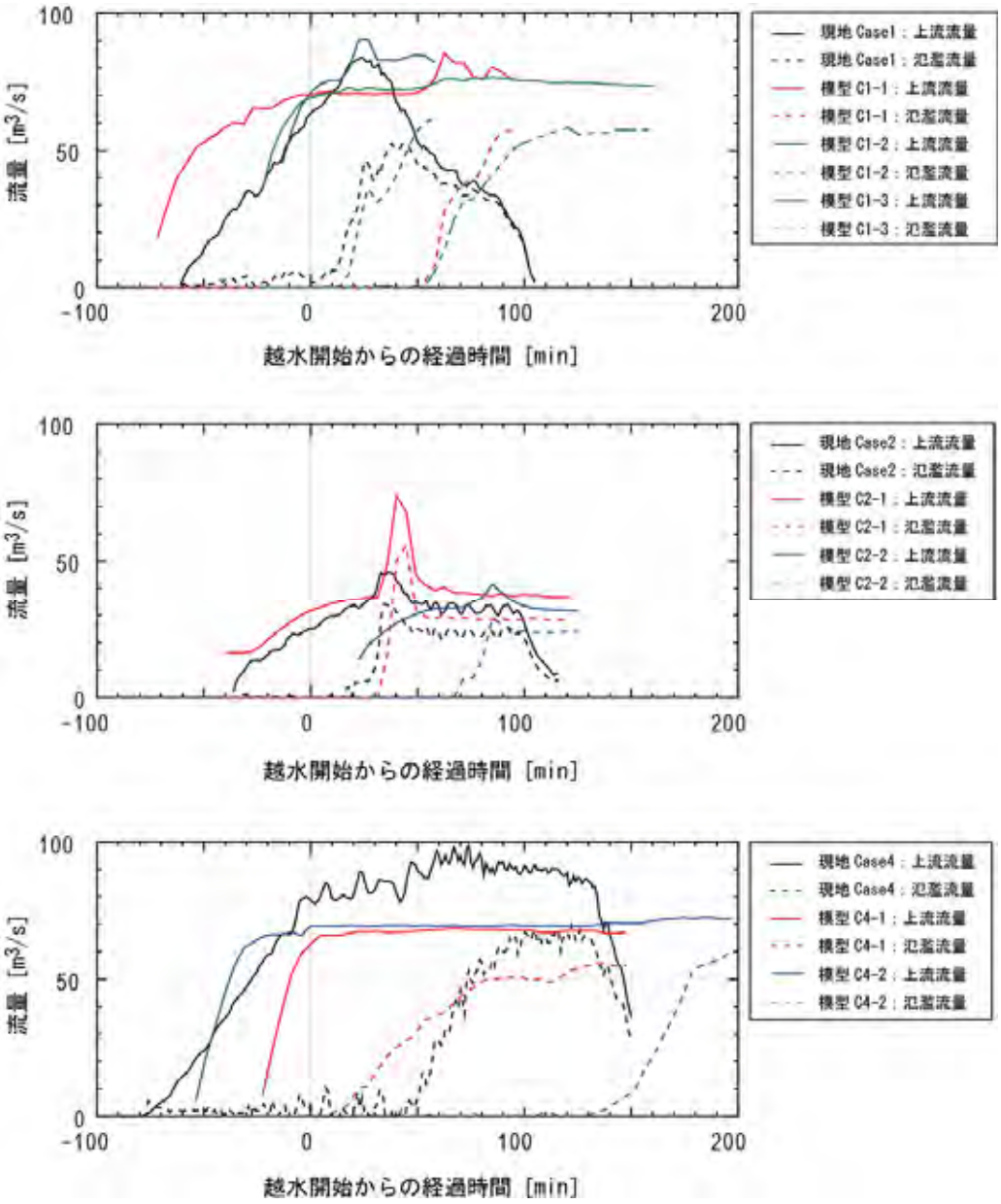


図- 126　上流流量と氾濫流量

d）氾濫流量の再現性

図- 126 に示すように，上流流量と氾濫流量について，ケース毎に現地と縮尺模型実験の結果を比較した．

各ケースとも，上流流量は異なるものの，氾濫流量の増加や，氾濫流量がピークに達した後にほぼ一定の流量を保って推移する傾向は概ね一致する．

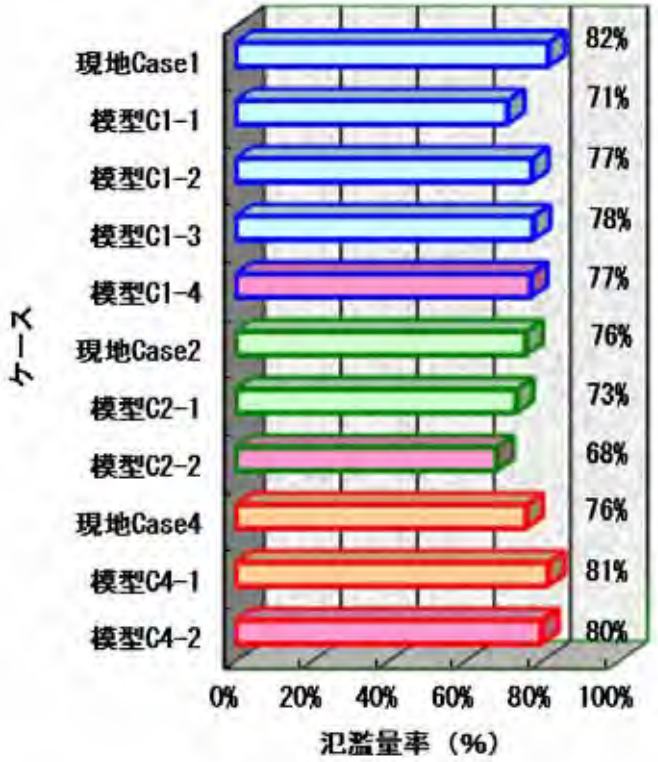


図- 127　氾濫量率

次に，破堤区間の上流流量と氾濫流量を用いて，(13)式より求めた氾濫量率を図- 127 に整理した．

$$氾濫量率(\%) = Q_{out} \ / \ Q_{in} \tag{13}$$

ここで，Q_{out}:氾濫流量，Q_{in}:上流流量である．氾濫量率(%)は，氾濫流量が一定となる時点で算出した．ただし，現地 Case1 及び C1-1・C1-2・C4-2 のように，氾濫流量が安定する前にゲートを閉じ始めた場合は，氾濫流量がピーク時点で算出した．

氾濫量率は，現地と縮尺模型実験の全ケースで約 70%～80%の範囲にあり，概ね同じ値となった．

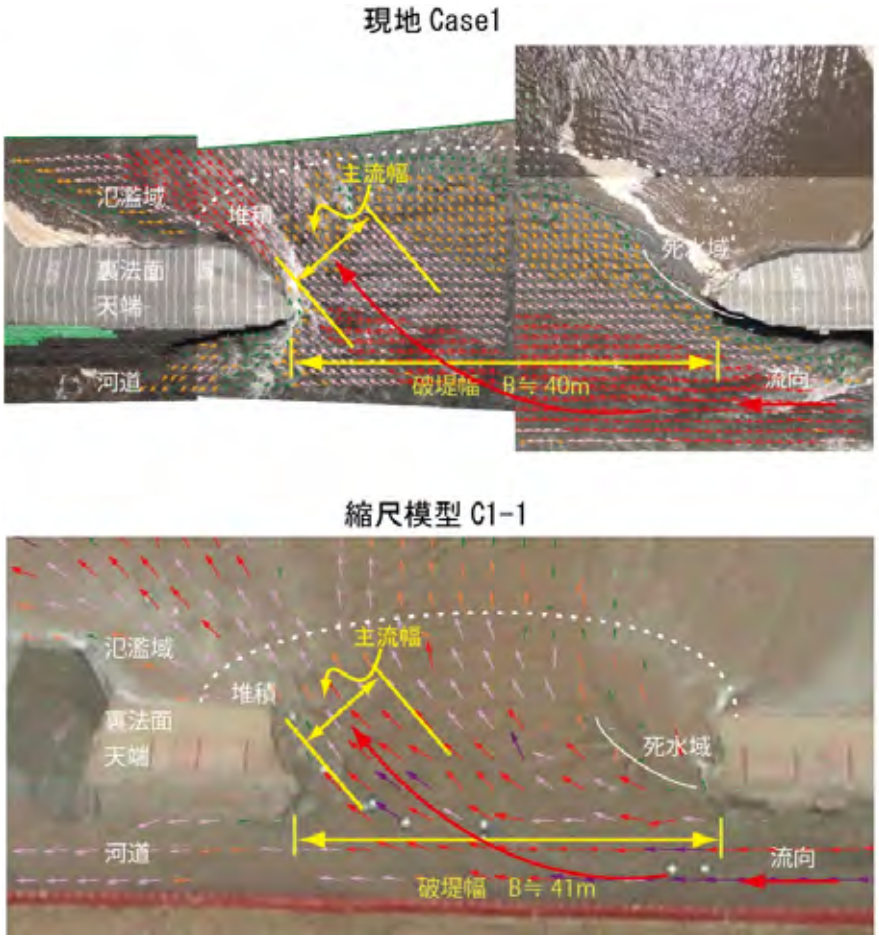


図- 128　破堤部の流況図

第Ⅱ部で述べたとおり，破堤拡幅が進行しても氾濫流が破堤口の全幅を流れるのではなく，下流側にほぼ一定幅の主流が見られ，破堤口上流側には流速の小さい範囲（死水域）が発生する．この主流が堤体にぶつかりながら破堤が下流方向に進行し，主流幅もほぼ一定を保ちながら下流に移動するため，氾濫流量もほぼ一定に近づくと考えられる．

図- 128 に現地と縮尺模型実験の破堤口部における流況比較の一例を示す．両者の傾向は概ね一致している．

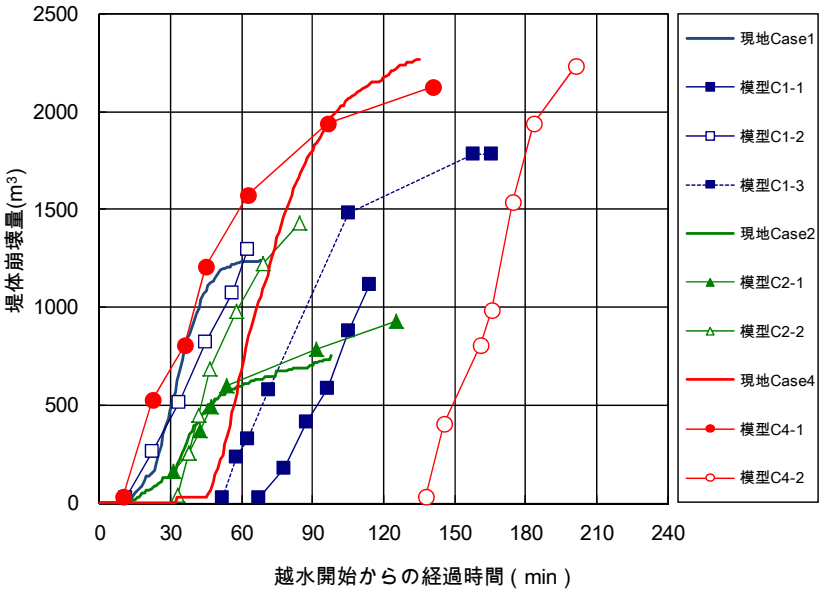


図- 129　堤体崩壊量の時間変化

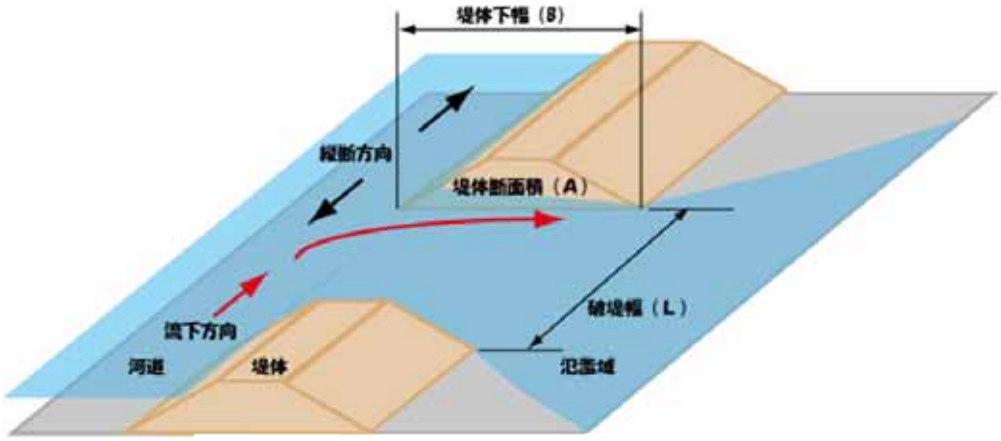


図- 130　堤体崩壊量の算出

e）堤体崩壊量の再現性

図- 129 に破堤拡幅開始以降を対象として，越水開始からの時間と堤体崩壊量の関係を整理した．ここで，縮尺模型はフルードの相似則で現地換算した．堤体崩壊量 V は，図- 130 に示すように，堤体断面積 A に破堤箇所の縦断方向の開口長さ(破堤幅) L を乗じて求めた．なお，実際の堤体崩壊量は，厳密には堤体下部の基礎地盤の洗掘量も考慮する必要があるが，ここでは概ねの傾向として，基盤より上部の堤体のみ流失するものとして整理した．

現地と縮尺模型を比較すると，破堤拡幅開始後の堤体崩壊速度は C2-2 を除き，概ね同様の傾向を示しているが，破堤拡幅開始までの所要時間は異なっている．

ここで，縮尺模型の実験条件はフルードの相似則を適用しているが，破堤現象は移動床に類似することから，時間縮尺については，流砂の相似則を適用する必要がある．そのため，流砂の相似による時間縮尺の補正を試みた．

流砂の相似については，堤体崩壊量を流砂量に見立てて，その相似比が縮尺比の 3 乗になるとして求めた．ここで流砂量は，*Meyer・Peter-Müller* の式から求めた単位幅当たり掃流砂量に，時間 T と堤体下幅 B を乗じて，次式(14)で表される．

$$\left[\frac{1}{s}\right]^3 = \frac{8(\tau_{*m}-\tau_{*cm})^{1.5}\sqrt{sgd_m^3}T_mB_m}{8(\tau_{*p}-\tau_{*cp})^{1.5}\sqrt{sgd_p^3}T_pB_p} \tag{14}$$

ここで，S:現地と縮尺模型の長さ L の比($S=20$)，τ_*:無次元掃流力，τ_{*c}:限界無次元掃流力，s:砂粒の水中比重，g:重力加速度，d:砂粒の粒径，T:時間，B:堤体下幅である．また，添字の p，m はそれぞれ現地と縮尺模型を表す．

これを整理すると，以下の相似則(15)式が成り立つ．

$$T_r = \left[\frac{1}{s}\right]^{0.5}\left[s^{1.5}d_r^{-1.5}(\tau_* - \tau_{*c})^{1.5}\right] \tag{15}$$

ここで，添字 r は現地と縮尺模型の比を表す．

[]内がフルード則の時間縮尺からの補正値となる．次に補正値を求める．計算条件は**表- 16** に整理した．まず，摩擦速度 u_*を(16)式にて求める．

$$u_* = \sqrt{ghi_e} \tag{16}$$

ここで，h:水深，i_e:エネルギー勾配である．ここでは，エネルギー勾配の代わりに河床勾配 i を用いて算出した．破堤口横断方向の水路勾配 i_*を適用する考えもあるが，i_*は時々刻々変化するので，ここでは適さないと考えた．縮尺模型の水深 h は破堤前の水深を適用した．

表- 16　計算条件・結果

ケース	水深 h(m)	河床勾配 i	水中比重 s	粒　径 d50(m)	補正値 Tr
現地Case1	2.46	0.002	1.69	0.00535	―
模型C1-1	0.14		1.65	0.00090	0.93
模型C1-2	0.14				0.88
模型C1-3	0.13				1.01
現地Case2	2.55		1.69	0.00492	―
模型C2-1	0.14		1.65	0.00090	1.02
模型C2-2	0.13				1.16
現地Case4	2.47		1.67	0.00074	―
模型C4-1	0.13		1.65	0.00090	1.24
模型C4-2	0.14				1.15

次に，限界摩擦速度 u_{*c} を岩垣の式(17)より求める．

$$
\begin{aligned}
&d \geq 0.303cm : u^2{}_{*c} = 80.9d \\
&0.118 \leq d \leq 0.303cm : u^2{}_{*c} = 134.6d^{31/32} \\
&0.565 \leq d \leq 0.118cm : u^2{}_{*c} = 55.0d \\
&0.0065 \leq d \leq 0.0565cm : u^2{}_{*c} = 8.41d^{11/32} \\
&d \leq 0.0065cm : u^2{}_{*c} = 226d \qquad (cm-\sec \quad \text{単位})
\end{aligned}
\tag{17}
$$

摩擦速度 u_* 及び限界摩擦速度 u_{*c} から無次元掃流力 τ_* 及び限界無次元掃流力 τ_{*c} を，おのおの次式(18)，(19)より求めることができる．

$$\tau_* = \frac{u_*^2}{sgd} = \frac{hi}{sd} \tag{18}$$

$$\tau_{*c} = \frac{u_{*c}^2}{sgd} \tag{19}$$

各ケースにおける補正値の計算結果を表- 16 に示す．

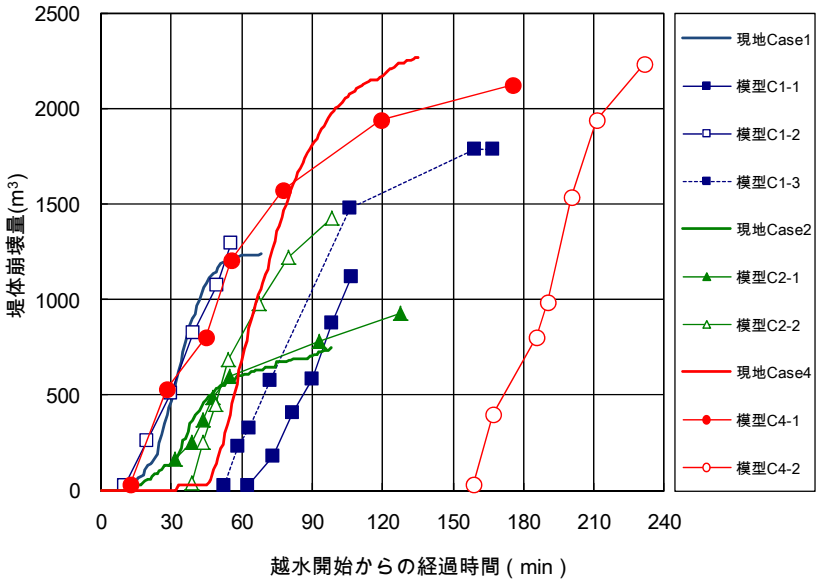


図- 131　堤体崩壊量の時間変化（補正後）

表- 16 に示す補正係数を乗じた堤体崩壊量の時間変化を**図**- 131 に示す．補正前と同様に現地と縮尺模型では，越水開始から破堤拡幅開始までの時間にバラツキはあるが，破堤拡幅がほぼ一定の速度で進行している間の堤体崩壊速度について，一部を除き，概ね同様の傾向を示している．

以上，流砂の相似則により時間縮尺の補正を試みた．わずかに現地と縮尺模型の状況が近づいたが，補正前と比べてそれほど変わらない結果となった．

(3) 縮尺模型実験のまとめ

千代田実験水路における越水破堤実験と同じ条件で行った縮尺模型実験について，千代田実験水路における実験と比較し，破堤状況の再現性を検証した．河道や氾濫域の流況，破堤拡幅の進行過程などについて，概ね千代田実験水路による実験の再現性が確認できた．今後，千代田実験水路における大規模な実験や調査等を補足するため，様々な条件で縮尺模型実験を活用できることが期待される．

まとめ

国内最大規模の実物大河川実験水路である千代田実験水路において，越水破堤実験を行い，河川堤防の越水破堤現象のうち，特に破堤拡幅機構について検討を行った．実験に先立ち，破堤実験に必要な各種計測手法の確認や基本的な破堤進行過程の把握を目的とした予備実験を行った．また，別途行った縮尺模型実験による再現性の検証も行った．

1. 予備実験

破堤実験を実施するにあたり，破堤進行中の堤体内部の崩壊状況を時系列で計測する必要があるが，その手法については実績がない．このため，実験に先立ち，計測センサーの選定や室内実験による検証を行い，堤体内部の破堤進行過程の計測手法の確立を図った．

千代田実験水路における越水破堤実験は，規模が大きく観測が広範囲にわたり，計測項目が多岐にわたるなど，前例のないスケールの実験である．このため，まず計測範囲・項目等の確認と基本的な破堤進行過程の把握を目的に，千代田実験水路において予備実験を実施した．

予備実験は，水路に横断方向に設置した堤防からの正面越流の破堤実験とともに，実河川と同じように水路に縦断方向に設置した堤防からの横越流による破堤実験を実施した．なお，横越流の予備実験については，堤体材料が異なる 2 ケース実施した．

主な結果を以下に示す．

- 破堤進行中の堤体崩壊過程を時系列に計測する手法として，堤体内部に加速度センサーを設置して，センサーの流出より堤体崩壊状況を感知する手法を確立した．また，電波式流速計や ADCP を用いて，より正確な時系列の流量観測手法を適用するなど，各種計測手法の確立を図った．

- 基本的な破堤進行過程に関して，破堤の初期段階では，堤体の越水部の裏法面侵食が主で，まだ破堤の拡幅は始まらず，これは正面越流の場合と共通の現象であった．その後，表法肩に侵食が達して堤体断面の大半が崩壊すると，正面越流では左右横断方向に，横越流では下流側に破堤拡幅が進行した．また，細粒分を多く含む堤体の実験ケースでは，砂礫分を多く含む堤体に比べ，越水開始から破堤拡幅が始まるまでの所要時間が長いなど，堤体材料により破堤状況に違いがあった．

2. 本実験

予備実験で得られた計測手法や条件設定等に関する知見を踏まえて，千代田実験水路において，広い氾濫域を設定した横越流の破堤実験を行った．実験は，河道流量(フルード数)，堤体材料，堤体形状（天端幅）の違いによる 4 ケースを実施した．

主な結果を以下に示す．

- 基本的な破堤進行過程に関しては，以下の 4 つの段階（Step）に分類できることが分かった（図- 98 参照）．

［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が，破堤拡幅は進行せず，氾濫流量は増加しない段階である．

なお，細粒分の多い堤体のケースと天端幅の広いケースでは，この段階の所要時間が他のケースよりも長かった．

［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し，氾濫流量が増加し始める．河道から破堤口に向かう流れがわずかに見られるが，河道の流況には大きな影響を与えていない．

なお，流量が小さく水面勾配の緩いケースでは，河道の下流側からも破堤口への流れがあり，破堤拡幅は上下流にほぼ対称に進行し始めた．また，天端幅の広いケースでは，河道からの流れが破堤口下流端の堤体の河道側にぶつかり，その流れがはね返って氾濫流がやや上流に向いていた．

［Step3；拡幅加速段階］

越水部の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．河道流から破堤口へと向かう流れが強くなり，その流速も大きくなる．また，氾濫流量が増加しピークを迎える．流況については，破堤口下流側の流速が大きくなり，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．

なお，流量が小さく水面勾配が緩いケースでは，他のケースより拡幅速度は小さかった．また，細粒分の多い堤体のケースでは，堤体が塊で崩壊する現象を繰り返しながら拡幅し，その速度は細粒分の少ない礫質土の堤体のケースに比べて速かった．天端幅の広いケースでは，他のケースに比べ，堤体の基盤に近い部分の侵食は堤体上部に比べて顕著に遅れて進行した．

［Step4；拡幅減速段階］

下流方向への堤体侵食とそれによる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．氾濫流量もほぼ一定で推移し，破堤拡幅速度は遅くなる．また，破堤口の下流端は，氾濫域側に顕著に斜めの形状となって破堤が進行する．

- 破堤進行過程と水理量の関係について，以下のことが分かった．
  - 初期破堤段階（破堤拡幅開始以前）においては，今回のような横越流の破堤実験においても，堤体侵食量と氾濫流量の関係が既往の正面越流実験結果に関する報告 [2)]と概ね同様の傾向となった．
  - 破堤拡幅が開始過程においては，堤体崩壊は氾濫流による堤体土塊の掃流現象として捉えられ，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された．

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る．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，条件を限定して行った実験の結果である．

3. 縮尺模型実験による再現性

千代田実験水路における越水破堤実験と同じ条件で行った縮尺模型実験について，千代田実験水路における実験と比較し，破堤状況の再現性を検証した．河道や氾濫域の流況，破堤拡幅の進行過などについて，概ね千代田実験水路による実験の再現性が確認できた．今後，千代田実験水路における大規模な実験や調査等を補足するため，様々な条件で縮尺模型実験を活用できることが期待される．

おわりに

本報告書は，国内最大規模の実物大河川実験水路である千代田実験水路において破堤実験を行い，河川堤防の越水破堤現象のうち，特に破堤拡幅機構について検討した結果を取りまとめたものである．今回の実験を通じて，破堤進行過程や水理量との関係などについて知見が得られた．今回の実験は，千代田実験水路の限られた条件の結果であり，今後の更なる調査研究とあわせて，破堤時の減災対策など，今後の河川防災に関する技術向上に資することを期待するものである．

今回の実験を行うにあたって，十勝川千代田実験水路検討委員会より，実験実施計画の策定や実験研究の方法等について，数多くの御指導や御助言を頂いた．また，十勝川千代田実験水路アドバイザー委員会においては，実験研究を円滑に進めるための御指導や御助言を頂いた．ここに御協力いただいた各委員に深く感謝の意を表する．

参考文献

1) 吉川勝秀:河川堤防学, 技報堂出版, pp. 98, 2008.

2) 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.

3) 例えば, 北川明・宇多高明・福岡捷二・竹本典道・服部敦・浜口憲一郎: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, 水工学論文集, 第 39 巻, pp. 489-494, 1995.

4) 例えば, 藤田光一・末次忠司・諏訪義雄・東高徳・白土正美・郡司篤・最上谷吉則:透水性(排気性)材料を用いた堤防裏法越水強化工法の水理的評価と技術的位置づけについて, 河川技術論文集, 第 7 巻, pp. 109-114, 2001.

5) 例えば, 石川忠晴:越水堤防調査, 建設省技術研究会報告(直技), pp. 802-809, 1982.

6) 例えば, 木村勝行・重野輝貴・成田国朝:越流に伴う堤体の破壊現象に関する研究, ダム工学会誌, Vol.9, No3, pp. 215-223. 1999.

7) 例えば, 藤田裕一郎・村本嘉雄: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講演概要集第 2 部, 第 42 回, pp. 559-560, 1987.

8) 例えば, 奥田浩司・髙橋迪夫・山崎僚・小澤徳雄・三浦剛:排水機能を持つ堤防裏法尻保護工に関する実験的検討, 水工学論文集, 第 51 巻, pp. 751-756. 2007.

9) 例えば, 田中祐一朗・梶野浩司・中谷剛:越流による河川堤防の一次元破壊, 土木学会年次学術講演会講演概要集第 2 部, 第 50 回, pp. 482-483, 1995.

10) 例えば, 重枝未玲・秋山壽一朗: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, 会河川技術論文集, 第 11 巻, pp. 169-174, 2005.

11) 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.

12) 例えば, 黄光偉・渡辺正明・泉宮尊司:都市域における洪水氾濫に関する実験的研究, 河川技術論文集, 第 10 巻, pp. 227-232, 2004.

13) 例えば, 辻本哲郎・鷲見哲也・北村忠紀:矢作川及び境川流域における 2000 年 9 月豪雨災害, 河川技術論文集, 第 7 巻, pp. 71-76, 2001.

14) 例えば, 藤田一郎・日野友尋:ヘリ画像を利用した新川洪水流の画像計測, 河川技術論文集, 第 7 巻, pp. 31-34, 2001.

15) 例えば, 辻本哲郎・鷲見哲也・寺本敦子・前田和:破堤拡大過程と河川特性の関係について, 河川技術論文集, 第 11 巻, pp. 121-126, 2005.

16) 例えば, 後藤仁志・林稔・織田晃司・酒井哲郎:越流水による河川堤防侵食過程のグリッドレス解析, 水工学論文集, 第 46 巻, pp. 439-444, 2002.

17) 例えば, 廣部英一・田安正茂・楳田真也・宇治橋康行・玉井信行:平成 16 年 7 月福井豪雨におけ

る足羽川の洪水災害と洪水流解析について, 河川技術論文集, 第 11 巻, pp. 133-138, 2005.

18) 十勝川千代田実験水路, URL：http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/riveroffice/chiyoda/zi/zi0.htm

19) 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, 水工学論文集, 第 53 巻, pp. 871-876, 2009.

20) 横山勝英・金子祐・高島創太郎：温度計測に基づく感潮河道の底泥浸食過程に関する研究, 水工学論文集, 第 51 巻, pp. 877-882, 2007.

21) 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, 河川技術論文集, 第 17 巻, pp. 371-376, 2011.

22) 例えば, 水理公式集（平成 11 年度版）, 土木学会, pp132-133, 1999.

23) 例えば, 宮脇幸大・泉典洋：越水による破堤プロセス, 土木学会北海道支部, 第 67 号, B-10, 2011.

24) 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