

横越流破堤の室内模型実験での再現性と 堤体形状による破堤拡幅現象の違い

Reproducibility of Hydraulic Experiment on Dyke Breach due to
Overflow and Influence of Dike Cross Section Profile to the Breach

佐野 賢司¹・渡邊 康玄²・武田 淳史³

Kenji SANO, Yasuharu WATANABE and Atushi TAKEDA

¹ 正会員 株式会社ニュージェック 水工グループ水工第一グループ (〒 531-0074 大阪府大阪市北区本庄東 2-3-20)

² 正会員 工博 北見工業大学教授 社会環境工学科 (〒 090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

³ 正会員 国土交通省 北海道開発局 帯広開発建設部 治水課 (〒 080-8585 北海道帯広市西 4 条南 8 丁目)

It is very important subject for the flood disaster prevention and reduction to understand the mechanisms on the breach of flood levee. However, since the phenomenon arises suddenly, the detailed observation of the breach is very difficult. In order to clarify the phenomenon on breach of flood levee, a small-scale hydraulic model experiment needs to be carried out. In this research, we tried to reproduce the result of the actual size hydraulics model test on the breach using the small-scale hydraulic experiment. As a result, it is found that although the reproducibility of the phenomenon in early stages of overflow is low, the reproducibility of the stage where the breach progresses is very high. The experiments to which the cross section profile of the levee was changed were conducted. It became clear that the erosion of foot of flood levee had big influence on the whole erosion phenomenon.

Key Words : flood levee, breach due to over flow, Chiyoda experimental channel, hydraulic experiment

1. はじめに

1976 年に気象庁がスタートさせた地域気象観測システム「アメダス」のデータによれば、この約 30 年間大雨の発生件数は増加傾向にある¹⁾。また、日本気象協会は「総雨量が 2000mm の大雨が「想定外」の事象とは言えない時代に入ったと考えている」との見解を示している²⁾。このように、大雨が増加傾向にあることは明らかであり、それに伴い河川においても更なる被害の拡大が懸念されている。

中でも堤防決壊はひとたび発生すると、その被害は甚大となる。図-1 に示した、2004 年の五十嵐川の例³⁾では越流による裏法面浸食により堤防決壊を引き起こし甚大な被害となった。被害を最小限に抑えるために、その対策が検討されてきているが、実物大の破堤実験を行った例は少なく、破堤機構の現象把握が進んでいない。この問題を解決するため、北海道帯広市近郊の千代田実験水路において実物大の横越流による破堤実験(以降; 現地実験)が実施された。この結果について、島田ら^{4),5)}は堤防の破堤状況を四段階に分け整理し、破堤拡幅以前については既往の正面越流実験結果に関する報告⁶⁾と概ね同様の結果となることを確認した。しかし、



図-1 五十嵐川の破堤写真³⁾

このような実物大規模の実験を様々な条件で実施する場合、費用や労力が莫大なものとなり、条件は限定的なものとならざるを得ない。渡邊ら^{7),8)}は、室内模型実験規模で千代田実験水路で行われた実物大の破堤実験を再現可能となる実験手法について、提案を行っている。しかしながら、これは 正面越流による破堤のデー

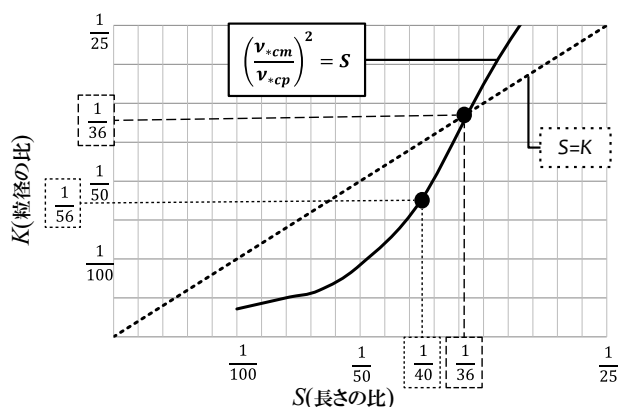


図-2 縮尺と粒径の関係

タを基にした知見であり、横越流による破堤が主となる実災害に即した破堤現象の解明には至っていない。

このような背景を踏まえ、本研究では現地実験結果⁹⁾を用いて、横越流による破堤機構及び進行過程が縮尺1/40程度の室内水理模型実験(以降;模型実験)でどの程度再現できるかを把握するとともに、その結果を用いて、堤防断面の違いによる横越流破堤機構の違いを把握することを目的とし、検討を行った。

2. 横越流水理模型実験の再現性

渡邊ら^{7),8)}は、室内規模の正面越流水理実験と千代田実験水路における正面越流実験の結果を比較し、破堤実験の模型縮尺について、流れと長さの縮尺に関してフルードの相似則を用いる場合、堤体材料の粒径の相似則として式(1)を満足させる必要があることを指摘している。

$$\left(\frac{v_{*cm}}{v_{*cp}}\right)^2 = S \quad (1)$$

ここで、 v_{*cm} :模型実験での限界摩擦速度、 v_{*cp} :現地実験での限界摩擦速度、 S :長さの縮尺である。

図-2は、後述する現地実験Case1の条件を考えた際の、堤体材料粒径の縮尺と長さの縮尺の関係を示したものである。本研究では、堤体の断面を変えた比較実験に先立ち、この結果を用いて現地実験の再現を試み、その再現性を確認することとした。

(1) 実験方法

図-2によると、長さの縮尺を1/36にした場合、堤体材料の粒径比も1/36となるため、検討に際し取りまとめが容易になることから、最適であると判断された。しかしながら、越水した氾濫流が水路側壁の影響を受けずに氾濫域に広がることを確保するため、氾濫域の幅

表-1 実験条件

ケース		堤防諸元				設定流量 (cm ³ /s)
		天端幅 (cm)	高さ (cm)	切欠形状 (cm)	法勾配	
現地Case1		7.5	7.5	深さ 1.25 上端 7.50 下端 2.50	1:2	6917
模型実験	C-1 (現地Case1再現)	7.5	7.5	深さ 1.25 上端 7.50 下端 2.50	1:2	6917
	C-2	7.5	7.5	深さ 1.25 上端 22.50 下端 7.50	1:2	6917
	C-3	30.0	7.5	深さ 1.25 上端 7.50 下端 2.50	1:2	6917
	C-4	7.5	7.5	深さ 1.25 上端 7.50 下端 2.50	表法 1:2 裏法 1:4	6917
	C-5	7.5	7.5	深さ 1.25 上端 7.50 下端 2.50	表法 1:2 裏法 1:6	6917

※ 現地Case1は模型値に換算

を十分広くする必要があり、千代田実験水路における氾濫流の挙動を考慮すると、今回使用する室内水路の大きさでは、長さの縮尺を1/40以下とする必要があるため、長さの縮尺を1/40、堤体材料の縮尺を1/56とすることとした。今回行った模型実験水路の概要を図-3に示す。

現地実験Case1の堤体形状を再現したケースを、模型実験C-1とした。河床勾配は1/500、上流からの供給流量は6917cm³/sである。なお、現地実験での堤体材料の平均粒径が $d_p=10.6\text{mm}$ であることより、模型実験の堤体材料の平均粒径は $d_m=0.188\text{mm}$ とした。既往の研究^{7),8)}で、平均粒径が同一の場合、粒径分布によって現象が大きく変化しないとの結論が得られている。また、細粒分を含む粒度分布とした場合、土粒子間の粘着力の影響が無視しえなくなり、現象の理解が複雑になることを避けるため、図-4に示すほぼ一樣なものとした。現地実験では通水による堤防浸食を防ぐために破堤区間にブロックを使用している。このため、模型実験ではアクリルスプレーを散布し、越流前の流水による堤防のり面の浸食を抑えることとした。実験条件を表-1に取りまとめて示す。なお、破堤口幅の時間的変化に関しては、実験前に堤体裏法面に1cm間隔にスプレーで印を付け、水路上部に設置したビデオカメラの映像より測定した。河床高については、横断的には1cm間隔、縦断的には10cm間隔に切欠部より上流側に2m、下流側に3mの範囲で、走行式台車砂面計測器を用いて測定を行った。また、推定氾濫流量は、上流からの供給量と水路下流端において計測した流量の差で求めた。

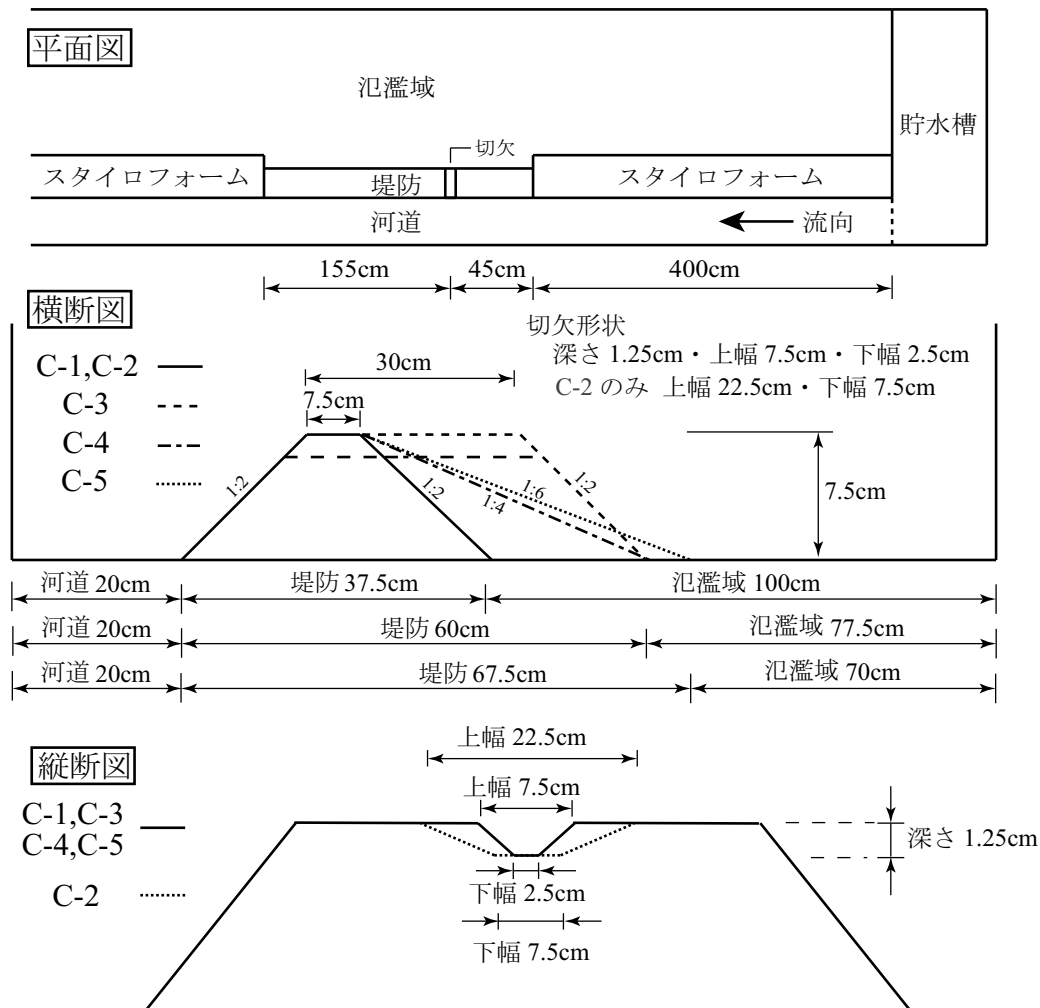


図-3 室内実験水路概要

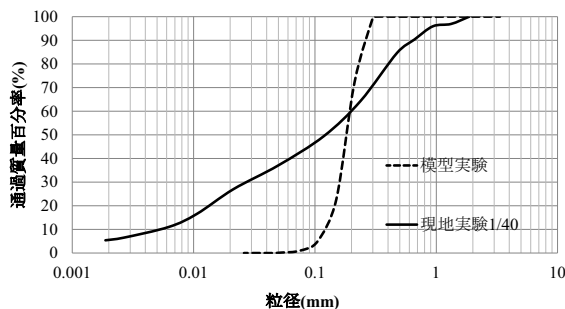


図-4 室内実験水路の粒度分布

3. 模型実験による破堤状況の再現性

(1) 現地実験 Case1 と模型実験 C-1 の比較

島田ら^{4),5)}は破堤現象の進行に合わせて、a) 初期破堤段階 (Step1), b) 拡幅開始段階 (Step2), c) 拡幅加速段階 (Step3), d) 拡幅減速段階 (Step4) に区分を行っている。今回の実験結果についても、この破堤現象の進行過程に合わせて述べることにする。実験状況の Step

毎の比較写真、破堤口幅の時間変化、破堤口幅と推定氾濫量の関係および通水後河床のコンター図比較をそれぞれ、図-5, 6, 7 および 8 に示す。なお、現地実験 Case1 の値は、模型実験と比較を行うため模型値に換算している。

a) 初期破堤段階 (Step1)

破堤開始後から切欠部の裏法面、裏法肩が浸食される初期破堤段階については、現地実験および模型実験とも正面越流に近い状況であった。しかし、現地実験 Case1 では越流開始から破堤口が広がるまでに縮尺後の時間で 200 秒ほどかかっているのに対し、模型実験 C-1 では越流と同時に破堤口の拡大が見られ、初期破堤段階が存在しない結果となった。

b) 拡幅開始段階 (Step2)

切欠部の表法肩まで越流による浸食が到達し、急激に断面が浸食され始める拡幅開始段階については、現地実験においては破堤拡幅が上下流方向に徐々に浸食を始め、破堤口がハの字に拡大する状況であった⁹⁾。しかしながら、模型実験では河道からの流れが破堤口下

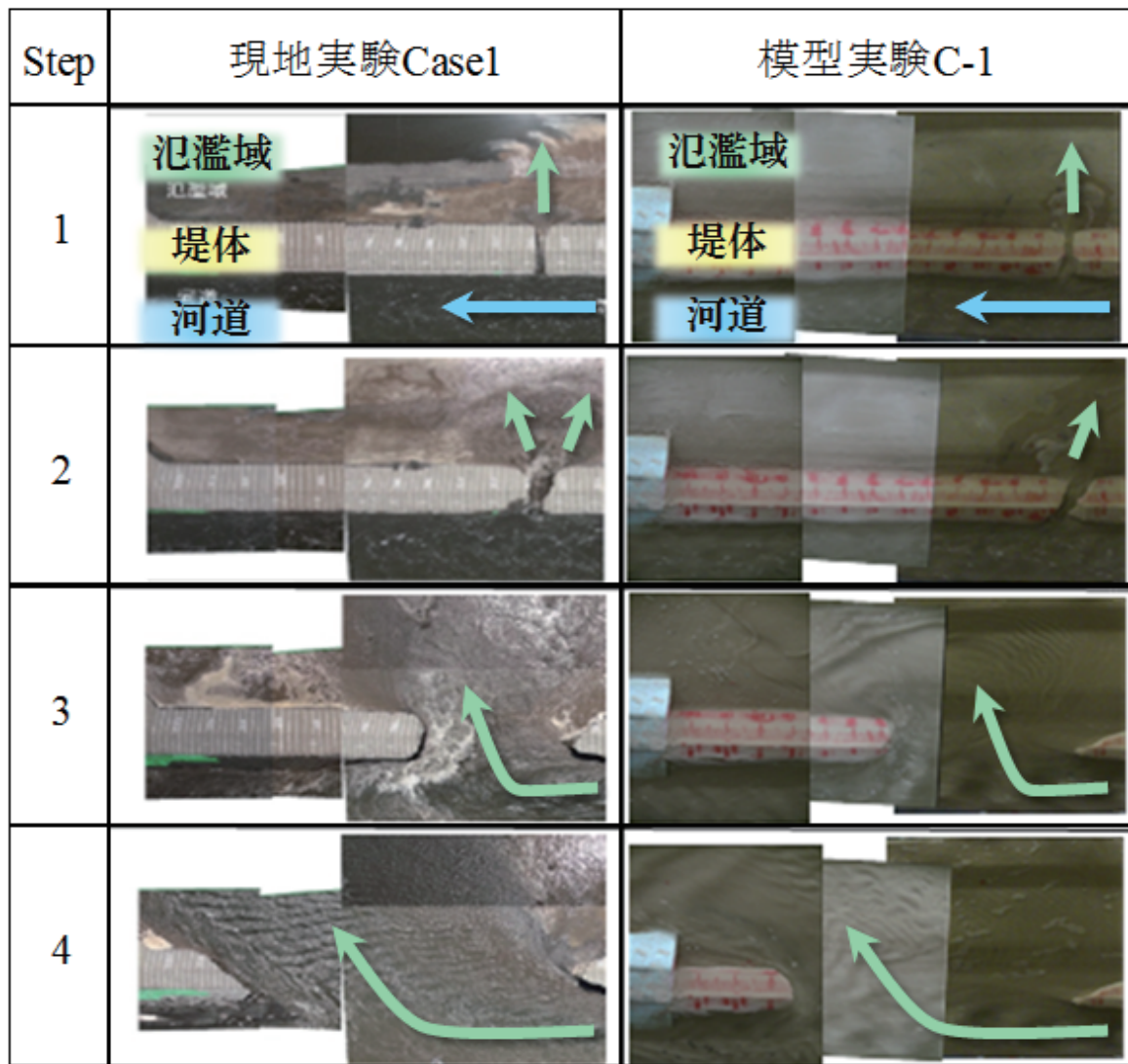


図-5 実験状況の Step 毎の比較写真

流側に衝突し、氾濫した流れが上流方向に向かうことに伴い、拡幅が上流にのみ進行した。また推定氾濫流量についても現地推定氾濫流量と比較し、上回っている。

c) 拡幅加速段階 (Step3)

切欠部の堤体断面の大半が浸食され、破堤口拡幅が急激に進行する拡幅加速段階については、拡幅速度ならびに氾濫域の流域において良好な一致を示したが、推定氾濫流量については拡幅開始段階に引き続き実験値が上回る結果となった。

d) 拡幅減速段階 (Step4)

下流方向への堤体浸食とそれによる氾濫域における土砂の堆積を繰り返しながら、氾濫流の主流部が一定の幅で移動する拡幅減速段階については、模型実験においても氾濫流の主流部が一定の幅で移動する傾向が見られた。また、この段階で氾濫流量は最大となり、最

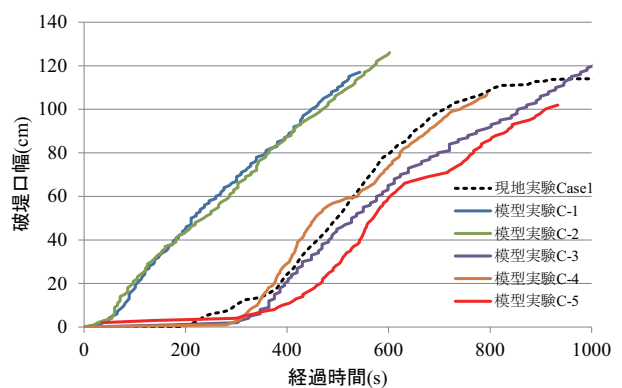


図-6 破堤口幅の時間変化

大氾濫流量が発生している時の供給流量に対する氾濫流量は現地実験 Case1 で 82%，模型実験 C-1 では 73%

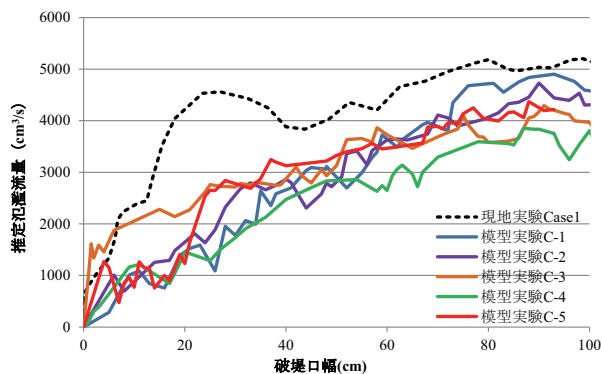


図-7 破堤口幅と推定氾濫流量の関係

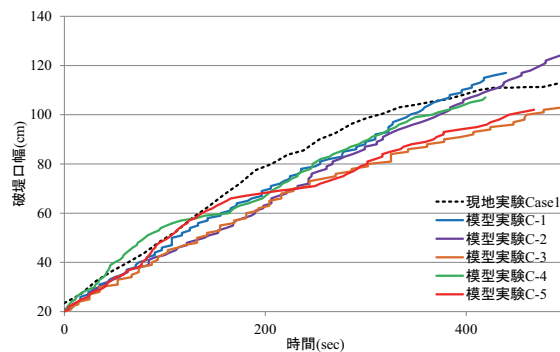


図-9 拡幅口幅 20cm 以降の破堤口幅の時間的变化

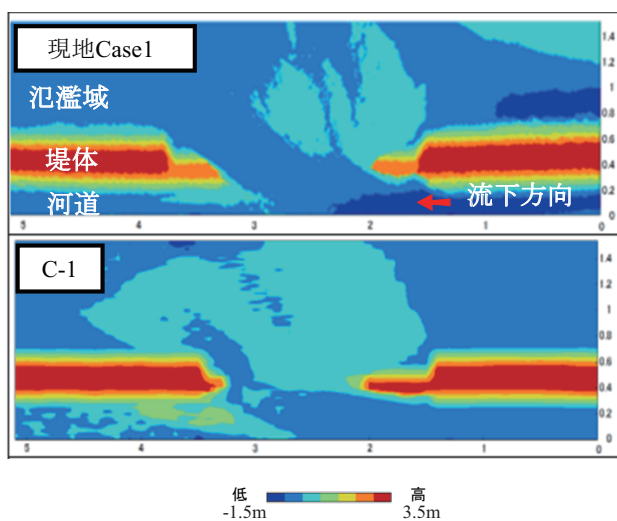


図-8 コンター図比較 (座標軸の単位:m)

と近い値を示した。

e) 最終形状

実験後の河床コンター図の比較において、模型実験 C-1 は、現地実験 Case1 における地形の特徴である破堤部上流の水路河床と破堤部下流端の氾濫域河床が大きく洗掘するとともに崩壊した堤体が氾濫域下流方向に大きく拡散している様子を、ほぼ再現している。さらに、最大洗掘深の位置も、破堤開口部下流端の裏法尻近傍に生じており、現地実験と同様の位置であった。しかしながら、最大洗掘深は模型実験の方が浅い結果となった。なお、上流からの供給流量を止めた経過時点や氾濫域の初期河床が現地実験と模型実験において若干異なるため厳密な意味での比較はできていない。

(2) 再現性についての考察

以上より、越水初期での再現性が低いことから、Step3 以降の破堤口幅の時間的变化を抽出して示したものが

図-9 である。模型実験 C-1 は、越水初期での再現性は低いですが、拡幅口幅 20cm(Step3) 以降については、現地実験 Case1 での開口部の時間変化を十分に再現していることが確認できる。また、図-5 より Step3 以降破堤部下流側の破堤状況、Step4 以降の推定越流量、破堤口幅と推定越流量の関係についても、概ね模型実験の再現性が確認された。

越水初期である Step1 および Step2 において、再現性が低下している要因については、越流水深が模型縮尺で 8mm となり、越流時の水深が十分な精度で再現されていなかったことや、河道上流部の切欠までの河道長が、現地実験よりも模型実験の方が長く、上流からの供給土砂が多いために河道部の河床洗掘が上手く現地実験を再現できず、越流量が減少した可能性が考えられる。また、伊藤ら¹⁰⁾が行っている 1/20 屋外水理実験においても、越水破堤初期での再現性の低下が報告されており、このことは今後更なる検討が必要であると考えられる。

4. 模型実験による堤防形状の検討

前節の検討で、模型実験は越水初期の現象は再現できていないものの、破堤し始めてからの現象は概ね現地実験水路の結果を再現することが可能であることが確認された。このことを踏まえて、現地実験では行われていない堤防形状や切欠の形状を変化させ現象がどのように異なるかについて検討を行った。なお、Step1 および 2 の現象は再現性が低いことから参考のために記述するとともに、Step3 以降の現象を主に扱うこととした。

(1) 切欠幅の違い

C-2 は、C-1 の切欠幅を 3 倍とした条件の実験ケースである。C-1 に比べ Step2 での推定越流量が増加し、拡幅速度も速いことが確認された。しかし Step3 以降の

拡幅速度は C-1 で 0.24cm/sec , C-2 で 0.23cm/sec と違いは見られなかった。また、最大氾濫量率は 73% と現地実験 Case-1 と同じであった。これは、初期の越流幅が広くとも、破堤につながる堤体の初期侵食はある程度幅が決まっており、その幅に現象が規定されるものと推察される。

(2) 天端幅の違い

C-3 は、C-1 の天端幅を 4 倍とした条件の実験ケースである。Step3 での推定氾濫流量が C-1 に比較し、増加する傾向が見られた。この現象については現段階では原因究明には至っていない。また、Step3 以降の天端の影響による破堤口幅の時間的变化については、Step3 での拡幅速度は 0.20cm/sec , Step4 での拡幅速度は 0.13cm/sec となり C-1 と比べ、Step3 と Step4 での速度差に開きが見られた。しかし、現地 Case1 の天端幅を 2 倍とした現地実験 Case4 においては、現地実験 Case1 と比べさほど変化は見られなかった⁹⁾。なお、現地実験 Case4 では、破堤現象を明確にするため越水開始 40 分より流量を増加させているため、明確な比較は現段階ではできないが、後述する堤体の裏法面勾配を 6 割とした場合の現象とも一致しており、堤体幅を広くすることにより、Step3 以降の破堤の進行速度を抑えることが可能であるとも考えられる。

(3) 裏法勾配の違い

C-4 は、C-1 の裏法面のみを 2 割勾配から 4 割勾配へと変えた実験ケースであり、C-5 は C-1 の裏法面のみを 2 割勾配から 6 割勾配へと変えた実験ケースである。両実験ケースの拡幅速度について、Step3 と Step4 の間で一時遅くなったが、これは破堤部における氾濫流の向きが上流側から下流側に遷移する際に、破堤部直下流の堤防裏法尻が浸食されるまで流向が変化しなかったことによって、天端の浸食が一時的に抑制されたためである。また今回の実験では、裏法面勾配がより緩やかである C-5 の方が流向が変化するのに時間を要する結果となった。このことは、破堤口の拡大抑制にもつながると考えられる現象であり、今後この点について十分検討を行う必要があると考える。なお、堤防幅を広くした C-3 では、堤防幅が全体的に広がっているため、氾濫流の流向が上流から下流へ向かう現象が緩やかに進んだため、破堤口幅の進行も緩やかに変化していったものと考えられる。

5. まとめ

実物大実験である千代田実験水路縦断破堤実験結果を室内実験において再現するにあたり、実際の堤体材料の粘着成分を省略し、さらに限界掃流力の比の二乗をスケール S に合致させる粒径を用いることで、Step3 以降の破堤口拡幅速度・推定越流量・破堤口幅と推定越流量の関係・氾濫量率・氾濫流の流況を精度よく再現できることを確認した。

また、堤防の断面積を増加させると Step3 以降の拡幅速度が遅くなることや、堤防裏法面勾配を緩くすることによって、破堤口拡幅速度を一時遅らせることが可能であることが明らかとなった。

今後は模型実験の検討ケースを増やすことにより、破堤における堤防断面の形状や水理量との関係を明らかにすることが可能と考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、寒地土木研究所、北海道開発局帯広開発建設部の方々より、千代田実験水路における貴重な実験データと多くの御助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 気象庁：異常気象レポート 2005。
- 2) 日本気象協会：総雨量 2000mm の時代を迎えて、トピックス, 2011。
- 3) 新潟県：「7・13 新潟豪雨洪水災害調査委員会報告書」, 2004。3。
- 4) 島田友典, 平井康幸, 辻珠希：千代田実験水路における越水破堤実験, 土木学会水工学論文集, 第 54 巻, pp.11-816, 2010。
- 5) 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.s-841-846, 2011。
- 6) 建設省土木研究所資料, 越水堤防調査最終報告書-解説編-, 第 2074 号, 1984。
- 7) 渡邊康玄, 山本昌慧, 島田友典：正面越流破堤の室内実験による再現性の検討, 土木学会水工学論文集, 第 55 巻, pp.847-852, 2011。
- 8) 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破堤の再現性の検討, 土木学会水工学論文集, 第 56 巻, I-1123, 2012。
- 9) 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：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, 2012。10。
- 10) 伊藤幸義, 渡邊康玄, 島田友典, 横山洋, 柿沼考治：越水破堤模型実験の現地再現性に関する検討, 河川技術論文集, 第 18 巻, 2012。6。

(2013. 4. 4 受付)