

横越流による破堤現象に関する実験的研究

Experimental Study on Dyke Breach by Side Overflow

北見工業大学大学院工学研究科土木開発工学専攻 ○学生員 佐野賢司 (Kenji Sano)
 北見工業大学社会環境工学科 正員 渡邊康玄 (Yasuharu Watanabe)
 北海道開発局帯広開発建設部 正員 島田友典 (Tomonori Shimada)
 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所 正員 飛田大輔 (Daisuke Tobita)

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⁾。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。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³⁾と概ね同様の結果となることを確認した。しかし、このような実物大規模の実験は予算や時間の都合、様々な条件で実験を行うことができない。渡邊ら^{6,7)}は、模型実験規模での越流破堤に関して後述する条件を用い、再現可能であることを指摘している。しかしながら、これは正面越流のみにおける知見であり、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⁸⁾とそれを縮尺1/20で再現した屋外水理模型実験結果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^{6,7)}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式を用いる場合、堤体材料の粒径の相似則式(1)を満足させる必要があることを指摘している。

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

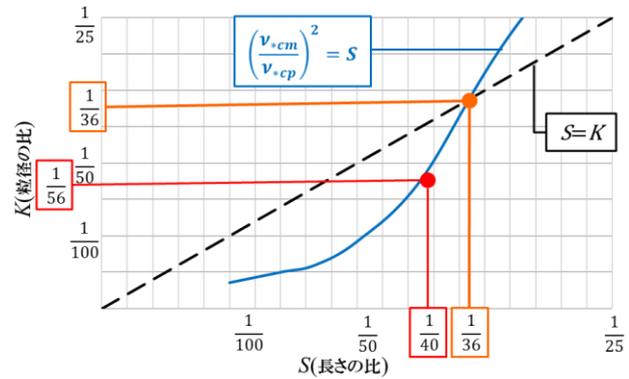


図-1 縮尺と粒径の関係

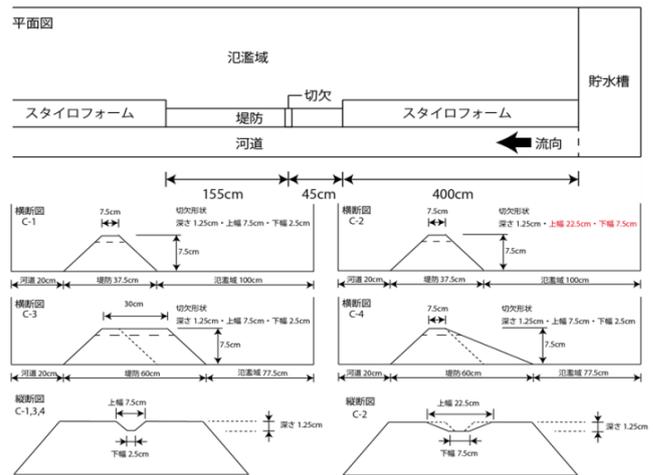


図-2 室内実験水路概要

ここで、 u_{*cm} ：模型実験での限界摩擦速度、 u_{*cp} ：実スケールでの限界摩擦速度、 S ：縮尺である。

図-1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。本研究では先ず、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-1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、室内水路の制約から最大で1/40とする必要があることから、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と状況を図-2, 3に示す。また河床勾配は1/500、上流からの流量は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

表-1 実験条件

ケース	堤防諸元				設定流量
	天端幅	高さ	切欠形状	法勾配	
現地Case1	7.5cm	7.5cm	深さ1.25cm 上端7.5cm 下端2.5cm	1:2	6917cm ³ /s
模型実験	C-1 (現地Case1再現)	7.5cm	深さ1.25cm 上端7.5cm 下端2.5cm	1:2	6917cm ³ /s
	C-2	7.5cm	深さ1.25cm 上端22.5cm 下端7.5cm	1:2	6917cm ³ /s
	C-3	30cm	深さ1.25cm 上端7.5cm 下端2.5cm	1:2	6917cm ³ /s
	C-4	7.5cm	深さ1.25cm 上端7.5cm 下端2.5cm	表法1:2 裏法1:4	6917cm ³ /s

※現地 Case1 は模型値に換算

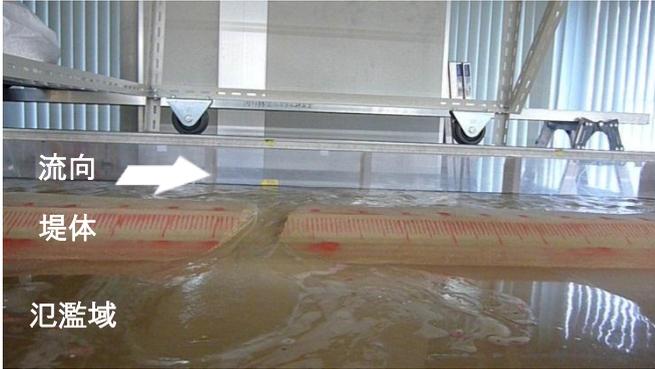


図-3 模型実験の状況

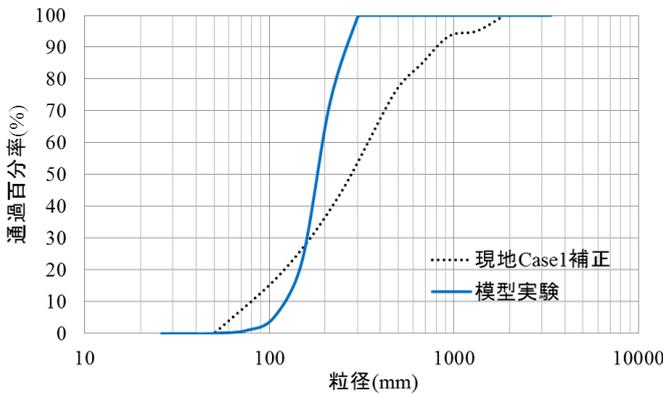


図-4 実験水路の粒度分布

あることより、模型実験の堤体材料の平均粒径は $d_m=0.1881\text{mm}$ とした。粒径分布は、既往の研究^{6,7)}で平均粒径が同一の場合大きな変化がないとの結論が得られていることから、図-4に示すほぼ一様なものとした。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が、模型実験ではアクリルプレーを散布し、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。各実験条件を表-1に示した。

3 模型実験による破堤状況の再現性

(1) 現地実験と模型実験の比較

島田ら⁵⁾は破堤現象の進行に合わせて、i)初期破堤段階(Step1)、ii)拡幅開始段階(Step2)、iii)拡幅加速段階(Step3)、iv)拡幅減速段階(Step4)に区分を行っている。今回の実験について、この破堤現象の進行過程に合わせて述べることとする。

現地実験 Case1

模型実験 C-1

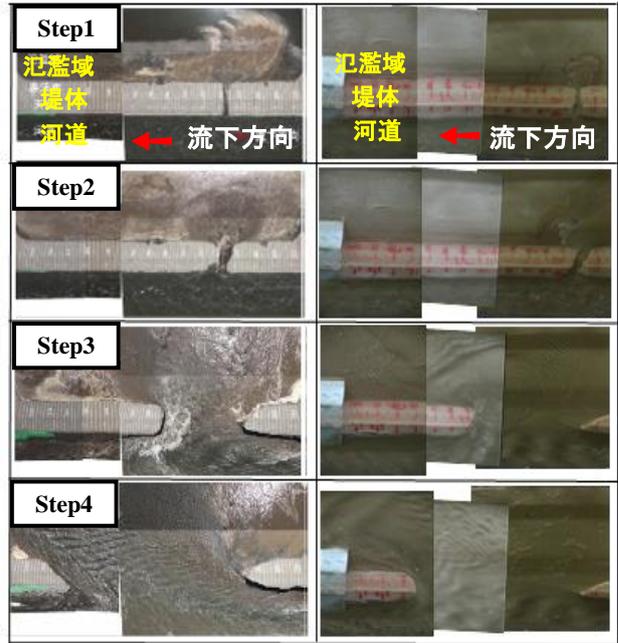


図-5 現地実験と模型実験の破堤状況

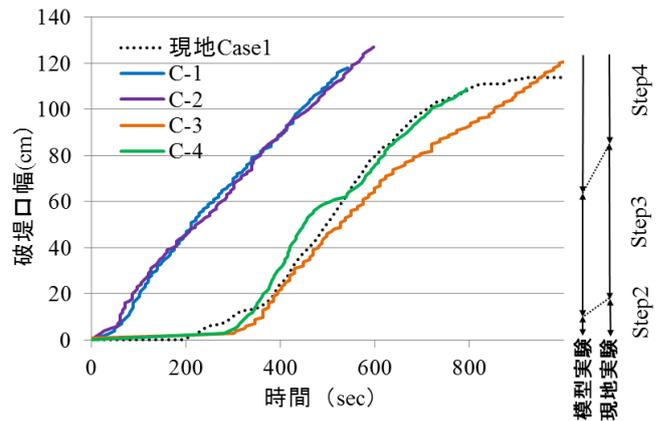


図-6 破堤口幅の時間的变化

図-5に各Stepにおける状況について、現地実験 Case1(以降; Case1)の結果と模型実験 C-1(以降; C-1)の結果の状況写真を示す。また、破堤口幅の時間変化、破堤口幅と推定氾濫量の関係、推定氾濫量の時間的変化の比較をそれぞれ、図-6, 7, 8に示す。なお、各値はCase1の値を模型値に換算した。

i)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・模型実験においても正面越流に近い状況であった。しかし、現地実験では図-6に見られるように、越流開始から破堤口が広がるまでに模型実験で200秒ほどかかっているのに対し、模型実験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。

ii)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口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。しかしながら、模型実験では河道からの流れが破堤口下流側に衝突し、氾濫した流れが上流方向に

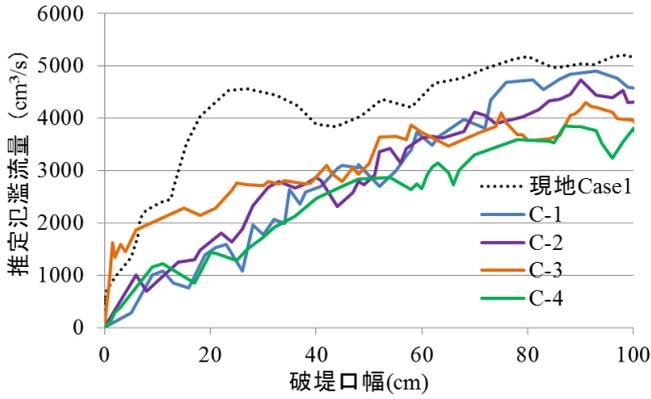


図-7 破堤口幅と推定氾濫流量の関係

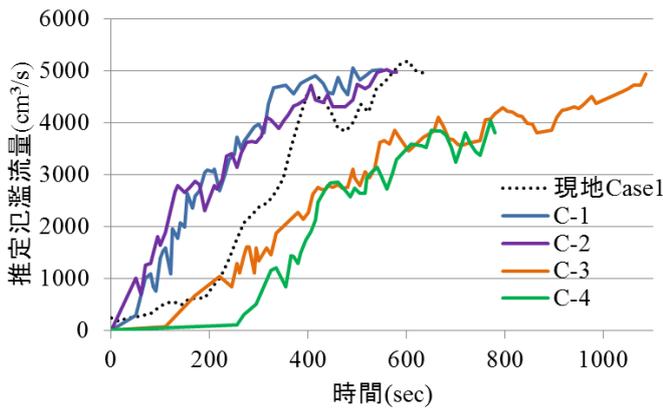


図-8 推定氾濫流量の時間的变化

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。

iii) **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、側岸浸食状況、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。

iv) **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同様な傾向が見られた。また、この段階で氾濫流量は最大となり、推定越流量率はCase1で82%、C-1では73%と近い値を示した。

v) **最終形状** ; 実験後の河床コンター図の比較において、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し、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はほぼ再現している。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であり同様の位置であった。図-9に各ケースの実験後河床コンター図を示した。なおこれは、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室内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ため、Step3以

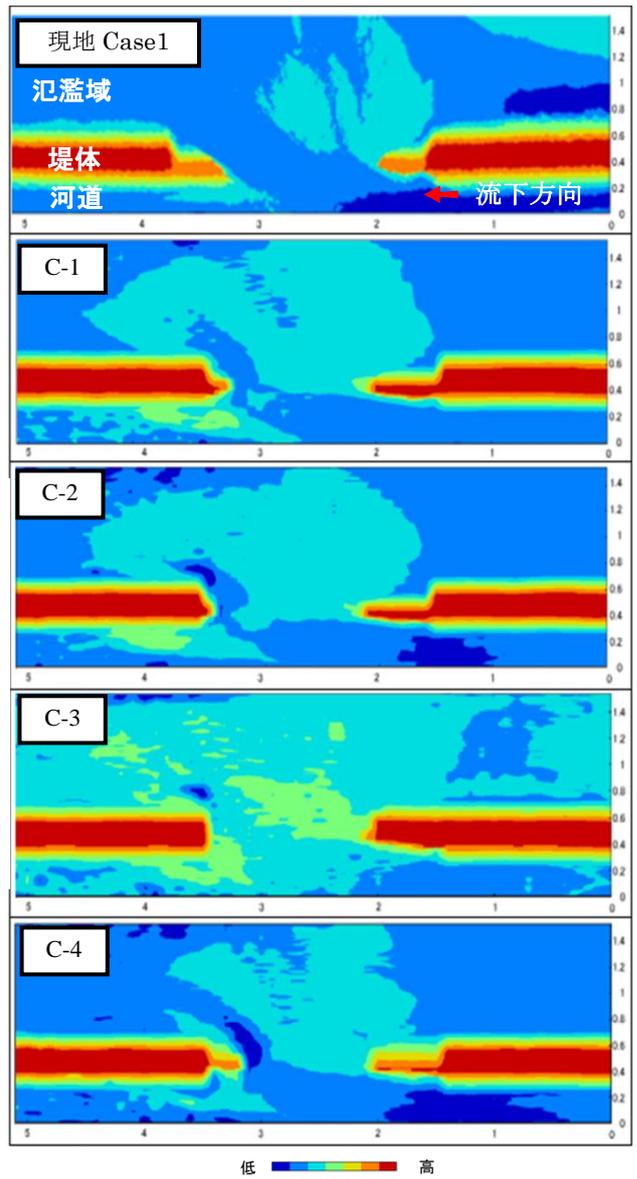


図-9 コンター図比較 (座標軸の単位 : m)

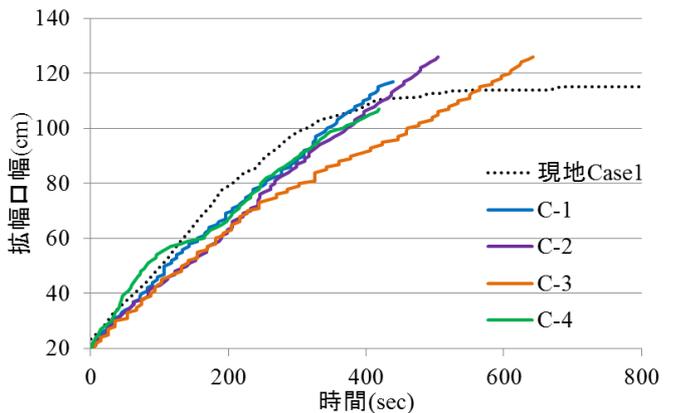


図-10 Step3以降の破堤口幅の時間的变化

降の破堤口幅の時間的变化を示したものが図-10である。Step3以降については、現地Case1dでの開口部の時間変化をC-1は十分に再現していることが読み取れる。Step1, 2での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

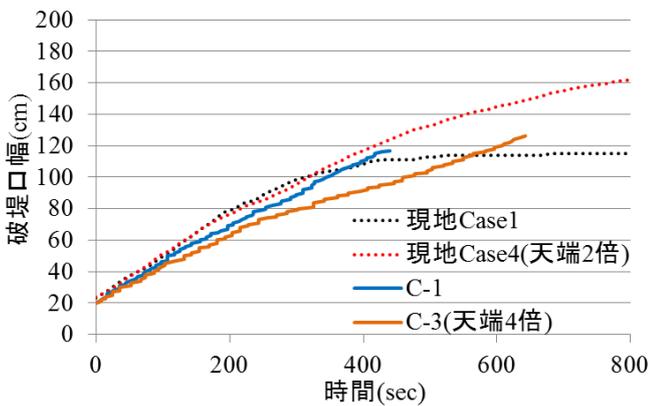


図-11 Step3以降の天端の影響による破堤口幅の時間的变化

分な精度で再現されていなかったものと考えられる。また、Step3以降の河道や氾濫域の流況、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る。

4. 模型実験による堤防形状の検討

C-1で得られた結果から、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と考えられる。このことを踏まえて、現地実験水路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。すなわち、Step1, 2の現象は参考のために記述するにとどめ、Step3以降の現象を扱うこととした。

(1) 切欠幅の違い；C-2は切欠幅をC-1の3倍に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Case-1と同じであった。

(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。また、Step3以降の天端の影響による破堤口幅の時間的变化を図-11に示すが、これによると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。現地実験Case4(現地Case1の天端幅を2倍にした条件)においては、Case1と比べさほど変化は見られなかった。しかしこれは、Case4において越水開始40分(図-11；破堤口幅20cm以前)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。

(3) 裏法勾配の違い；C-4はC-1の条件について、裏法面のみを4割勾配とした実験ケースである。拡幅速度について、Step3では0.28cm/secであり、Step4では0.21cm/secとなった。またStep3とStep4の間で速度が

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。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。

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、Step1での破堤口拡幅速度について、切欠幅よりも越流水深の影響の方が大きいことが推定される結果を得た。さらに、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、破堤しづらい断面・形状等のさらなる検討を行う予定である。

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) 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。
- 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) 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。
- 7) 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。
- 8) 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。