

縮尺模型による越水破堤実験について

—千代田実験水路との比較—

独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地河川チーム ○柿沼 孝治
島田 友典
独) 土木研究所寒地土木研究所 水環境保全チーム 横山 洋

北海道開発局と寒地土木研究所では、H18 に完成した千代田実験水路において、実スケールの破堤実験を行い多くの有用な知見を得たところである。しかしながら、千代田実験水路の実スケール実験はケースが限られることから、寒地土木研究所では、千代田実験水路を1/20で再現した縮尺模型による破堤実験を行い実スケール破堤実験との比較検討を行った。結果は、破堤進行の様子や流況については概ね良好な再現性が確認でき、また、破堤口拡幅速度（破堤の進行速度）についてはフルード相似則は適用できないものの傾向としては概ね良好な再現性であった。

キーワード：越水破堤，縮尺模型実験，千代田実験水路，破堤機構

1. はじめに

近年日本列島において、毎年のように台風などに伴う集中豪雨が発生し、河川の氾濫が起こっている。特に破堤を伴う河川氾濫は、大きなエネルギーが一気に氾濫域に放出されることで、甚大な被害をもたらす。このような越水破堤に対する被害軽減対策を検討するには、まずそのメカニズムを解明することが重要である。

これまで、越水破堤についての研究は、現地の被災箇所調査や、破堤初期を扱う正面越流実験等の成果をもとに行われてきたが、破堤の進行過程におけるメカニズムは不明な点が多かった。そこで、北海道開発局と寒地土木研究所では、H18 に完成した千代田実験水路において、実スケールの破堤実験を行ってきており、越水破堤機構について多くの有用な知見を得たところである^{1)~7)}。しかしながら、千代田実験水路による実スケール実験は大規模であり、実験ケースは限られることから、寒地土木研究所では実験準備も兼ねて、千代田実験水路を1/20で再現した縮尺模型による破堤実験を行った。

本研究では、1/20縮尺模型による破堤実験の結果及び、千代田実験水路における実スケール破堤実験との比較検討について報告する。

2. 縮尺模型実験の概要

(1) 千代田実験水路における破堤実験の概要

千代田実験水路は、十勝川の治水対策施設である千代田新水路に併設されている実験水路である。実験水路の全景を図-1に示す。

千代田実験水路幅は、実験に必要な水深を確保するため、鋼矢板を用いて30mから8mに縮小している。



図-1 千代田実験水路全景

堤体は背割堤(高さ4m・天端幅5m・法勾配2割)を破堤実験区間のみ削り取り、高さ3m・天端幅3m・法勾配2割に整形し、破堤きっかけとして切欠(深さ0.5m・上幅3m・下幅1m)を設けている。

氾濫域は新水路(水路幅115m)を利用している。表-1に実験条件を示す。

表-1 現地実験条件

	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	実施	実施	
Case1	70m ³ /s	砂礫	3m	3m	1:02	2010年	4月	約4年
Case2	35m ³ /s						8月	
Case3	70m ³ /s	細粒分	6m			2011年	4月	約1年
Case4		砂礫					6月	

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

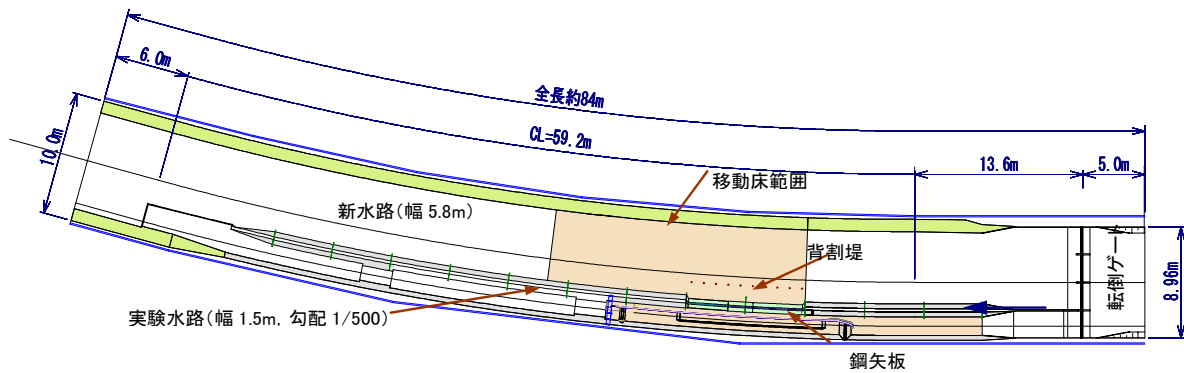


図-2 模型平面図

る手法”を用いた⁸⁾。

鋼矢板は木製で凹凸状況も再現し、実験水路内の粗度係数が現地のそれと合致していることを検証した。なお、相似則はフルードの相似則を適用している。

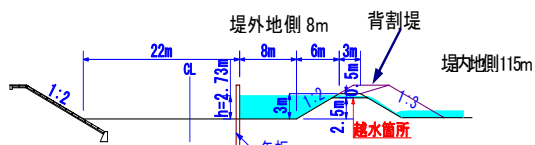


図-3 模型断面図

(3) 実験ケース

模型実験の条件は、基本的に現地実験条件を踏襲したが、前述したように土質による相違を縮尺模型で再現するのが困難だったため、表-2に示すケース（現地Case1, Case2, Case3に相当）とした。



(上流から下流) (下流から上流)

図-4 模型全景

表-2 模型実験ケース

現地実験 ケース	模型実験 ケース	堤防水路形状				流量 (m ³ /s)	備考
		天端幅 (m)	裏法勾配	水路幅 (m)	河床勾配		
1	Cl-1	3	1:2	8	1/500	70	基本ケース
	Cl-2	3	1:2	8	1/500	70	
	Cl-3	3	1:2	8	1/500	70	
2	C2-1	3	1:2	8	1/500	35	流量変化
	C2-2	3	1:2	8	1/500	35	
4	C4-1	6	1:2	8	1/500	70	天端幅変化
	C4-2	6	1:2	8	1/500	70	

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ものである。なお、縮尺模型実験では、堤体土質の相違を再現するのは困難であるため実験ケースから除外した。

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、同箇所に築堤を行い2011年に上流区間でCase3, 下流区間でCase4を実施した。

(2) 縮尺模型実験の概要

模型規模は、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および新水路合流堤下流まで合計84m(現地1680m)区間とした。(図-2, 図-3, 図-4)

移動床範囲は、図-2のハッチングした範囲とし、深さ約190mm(現地約4m)まで、平均粒径0.55mm(現地粒径11mm)の粒径加積曲線に合わせた混合砂を敷設した。

破壊する現地の砂礫堤防は、シルト分が15%程度含まれている若干粘着性がある土質であるため、坂野が破堤模型実験で採用した“砂にベントナイトを配合す

(4) 計測方法

計測方法を表-3に、計測位置を図-5示す。

表-3 実験計測方法

項目	計測方法
破堤口幅	上からの写真から解析 実験水路側の破堤口幅とした
氾濫量	氾濫量=上流給水量-下流流量 但し、上流湛水部の水位低下量も考慮
水位	サーボ式水位計
	ピエゾメーター(鋼矢板沿い)
流速	電磁流速計(実験水路上流部)
	PIV解析(実験水路~氾濫域)
河床高	水平糸からの下がり量で計測 局部的洗掘はレベル測量
映像	デジタルビデオカメラ
	デジタルカメラ

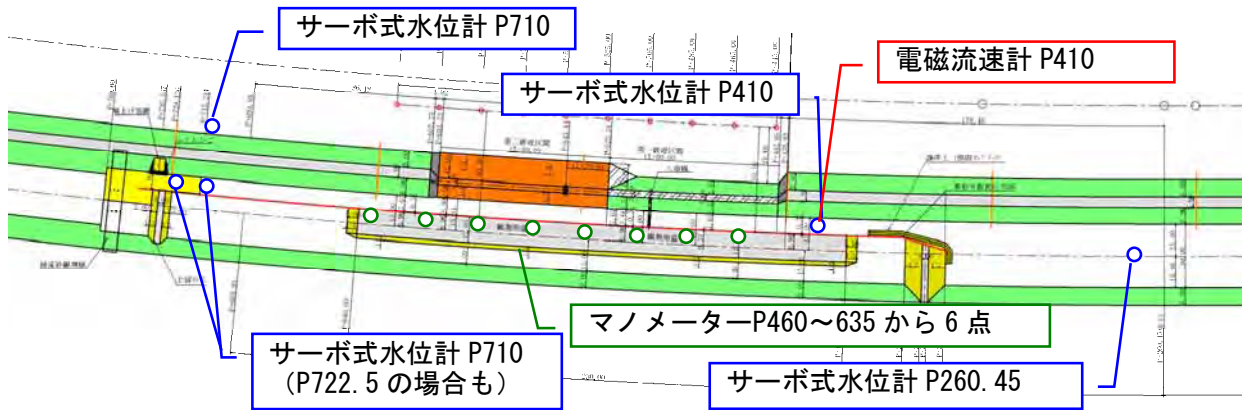


図-5 計測位置

表-4 破堤の再現性

Step	模型の破堤状況	現地実験の再現性	現地 step 1 状況	模型 step1 状況
1	裏法面、裏法肩が侵食されて、正面越流に近い状況	裏法面、裏法肩の階段状の侵食形状は近似するが、侵食速度は合致しない。		
2	河川の流れが、切欠部下流側岸に衝突して、切欠幅の若干の拡幅と天端の下方への侵食が生じている状況	破堤口がハの字に拡大する状況、下方侵食・側岸侵食形状はよく近似する。		
3	下方への侵食が基盤まで達し、下流への側岸侵食進み、急激に氾濫量が大きくなる状況	側岸侵食形状・侵食速度・氾濫量もほぼ再現し、相似性は高い。		
4	河川水位の低下と流量の減少に伴い、破堤部下流側の侵食速度が低下する。現地2では下流への側岸侵食は継続しているが、上流側でも堆積が生じ、有効な越水幅および氾濫量が一定になる。	破堤した土砂の氾濫現への堆積状況の再現性は高い。特に模型は破壊堤防幅を長く設定できるため、破堤部の氾濫有効幅と氾濫量が一定になるまで実験が可能である。		

図-6 各 step の状況

3. 実験結果

(1) 破堤の状況

表-4 に越水開始から破堤終了まで、4つの step に分割して、模型の再現性について整理するとともに、図-6 に各 step の状況を示す。なお、各 step は現地実験で観察された破堤機構の特徴から分類したものである。

切欠部から越流が開始してから堤防破壊が進行する状況は、現地実験においても、模型実験において図-6

に示すように再現性は良好であることを確認した。

(2) 流況

上流流量と氾濫量(上流流量-下流流量)について、ケース毎に現地と模型を整理したものを次ページの図-7、図-8、図-9 に示す。

ケース1の模型及びケース2とケース4では、氾濫流量が、ある破堤口幅に達すると、その後破堤口は拡幅が続くが、氾濫量は一定になることがわかる。例え

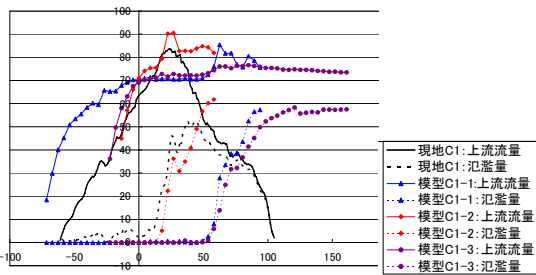


図-7 上流流量と氾濫流量 (ケース1)

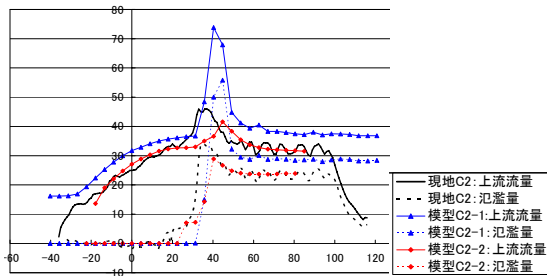


図-8 上流流量と氾濫流量 (ケース2)

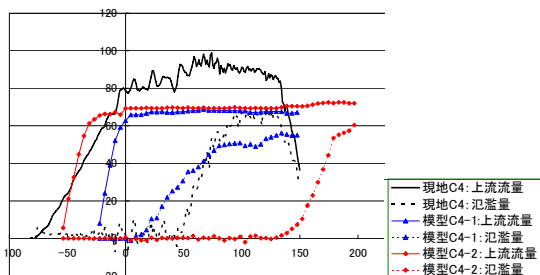


図-9 上流流量と氾濫流量 (ケース4)

ば、模型 C1-3 の氾濫量は、越水開始から 120 分後にはほぼ 58m³/s と一定となっているが、破堤口の拡幅は継続している。ただし、ケース 1 の現地は、途中で給水を止めてしまった可能性が高いことがわかっている。

(3) 破堤拡幅速度

図-10に、越水開始からの時間(分)と破堤口幅(破堤箇所の縦断方向の開口長さ)の関係を示す。

破堤口が側方に拡幅し始めるまでの時間については、現地実験と模型実験の整合性は良くない。また、同じケース間でも最大120分とバラツキがある。これは、模型実験では、越流水深や締め固め度、給水量の精度にバラツキがあり、特に越流量が小さい越水初期はバラツキの影響が大きく出たためと考えられる。

破堤口が拡幅始めると、基本的にほぼ一定速度で拡幅していき、ある幅に達すると拡幅の進行速度が低下する。模型実験C1-3とC2-1, C4-1, 2, 現地実験天端6m

は破堤範囲を広くとり、長時間通水したため、これらのケースについては、破堤口の拡幅速度が低下するまで実験を継続したが、それ以外のケースでは、破堤口拡幅の進行速度が低下する前に給水を停止してしまった可能性が大きい。

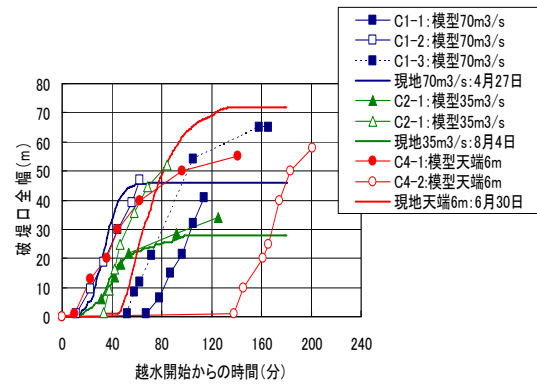


図-10 破堤口幅の経過

破堤口がほぼ一定速度で拡幅する間の破堤拡幅速度を、図-11に整理した。ケース1では、模型が0.8~0.9m/分と現地の1/2倍程度、ケース2では模型C2-1は再現性が良好だが、模型C2-2は現地の2倍程度、ケース4では模型が現地の1/2倍程度であった。

また、模型実験では天端幅3m(C1)より、天端幅6m(C4)の方が破堤拡幅速度は小さく、予見された結果となったのに対して、現地実験ではケース1とケース4がほぼ同一で変化が見られない。これについては、現地実験の分析が待たれるところである。

模型C2-2が突出して大きい要因は不明であり、今後の課題とする。

これらの結果より、現地と模型での相似則は、単純なフルードの相似則は適用できないものの、傾向は再現していると考えられる。

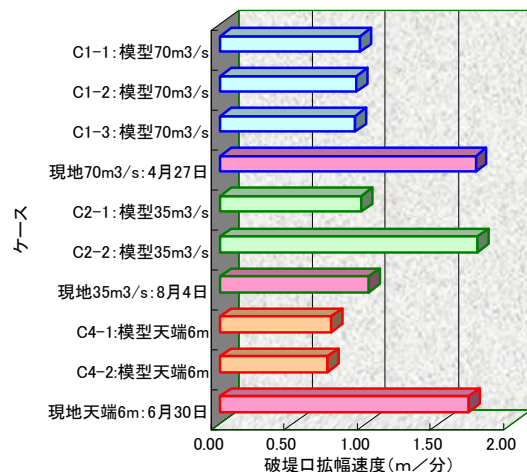


図-11 各ケースの破堤拡幅速度

4. 考察

破堤口幅がある値以上になると氾濫量が一定になるのは現地実験と同様に、模型においても観察されたところだが、破堤進行状況や流況から次の通り考察した。

図-12 模式的に示したように、破堤口の拡幅がある程度進行すると、破堤口上流側に流速の小さい範囲(死水域)が発生する。これにより、流速が速い有効な流れの幅(有効幅)は破堤口幅の半分程度となり、堤防侵食、基盤の洗掘、氾濫域への土砂堆積、洗掘基盤部の落堀の埋め戻し現象を繰り返しながら有効幅の位置は下流へ移動していく。そして、ある破堤口幅になると平衡状態となり氾濫量が一定になると考えられる。

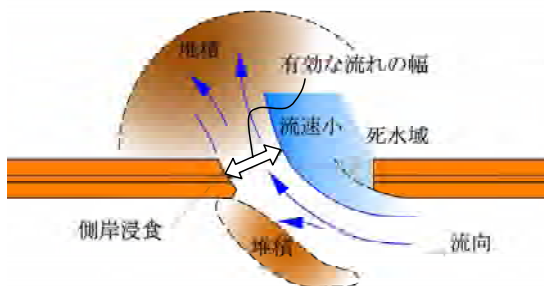


図-12 破堤進行中の破堤口付近の状況

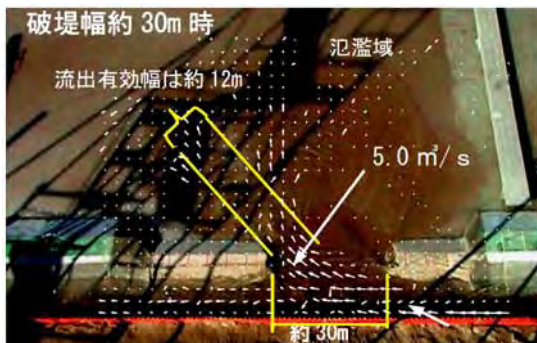


図-13 破堤部流速ベクトル (破堤幅 30m)

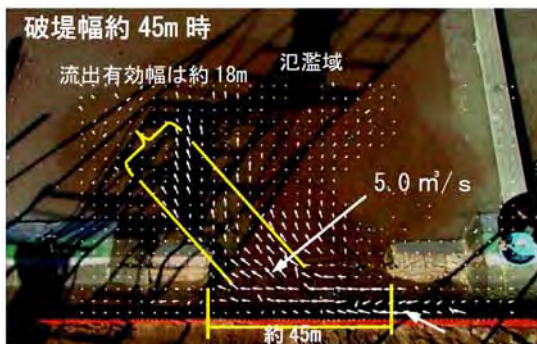


図-14 破堤部流速ベクトル (破堤幅 45m)

たとえば、図-13、図-14 に示すように、模型実験 C1-2 では、破堤口幅が 30m のとき有効破堤口幅は約 12m、また氾濫流量がほぼ一定値となった破堤口幅 45m のときには、有効破堤口幅は約 18m となり、破堤口幅の 2 分の 1 程度になっているのがわかる。

次に、破堤拡幅速度について、詳細は現地実験の考察に譲るとするが、step3 以降の破堤機構は、河岸浸食機構に似ていることがわかっている。基本的には流水の掃流力により堤防材料が浸食されるメカニズムである。このことは、破堤拡幅速度にフルードの相似則が適用出来なかったこと原因の一つであると考えられる。現地実験の分析では、破堤が進行している破堤口先端の流速から無次元掃流力を算出し、限界無次元掃流力との差に注目して破堤拡幅速度との関係を導こうとしている。したがって、模型実験においても同様の手法により解析することが必要となる。今回の模型実験においては、C2-2 を除くと、模型実験の拡幅速度を仮に 2 倍すれば現地実験を再現できる結果となったが(図-15)、これに定量的な考察を加えることが今後の課題である。

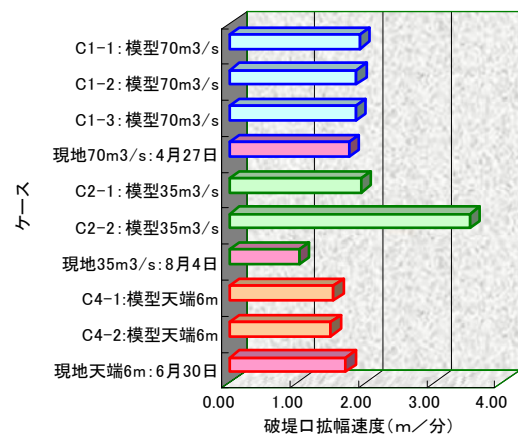


図-15 破堤拡幅速度 (模型の値を 2 倍)

5. おわりに

破堤口拡幅速度や最終破堤口幅は、氾濫ボリュームの推定にあたって重要な要素となるものであり、河道及び水理条件との関係づけが待たれるところである。

現地実験は非常に大規模なものであり、多くのケース実験を行うことが困難である。従って、今後は模型実験により様々な条件ケースの実験を行い、現地実験で得られた知見を発展させていくことが重要である。

同時に、現地実験の更なる分析に合わせて、模型実験による再現性についても引き続き検討する必要がある。

参考文献

- 1) 千代田新水路の概要及び千代田実験水路, 国土交通省北海道開発局帯広開発建設部,
<http://www.ob.hkd.mlit.go.jp/hp/riveroffice/chiyoda/index.html>
- 2) 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, pp871-876, 2009.
- 3) 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, pp811-816, 2010.
- 4) 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, pp841-846, 2011.
- 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越水破堤拡幅メカニズム, 土木学会河川技術論文集, 第17巻, pp263-268, 2011
- 6) 稲垣達弘・島田友典・三宅洋: 千代田実験水路における新手法を用いた流量観測について, 平成22年度北海道開発技術研究発表会, 2011.
- 7) 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, pp41-46, 2011.
- 8) 坂野章: 樹林帯による破堤後の減災効果に関する検討, 土木技術資料, 2002.