模型実験による氾濫域を含む越流破堤メカニズム検討

STUDY FOR THE DESTRUCTIVE MECHANISM OF THE OVERFLOW LEVEE AND FLOODING AREA BY SCALE MODEL EXPERIMENTS

伊藤 幸義¹・島田 友典²・横山 洋³・坂野 章⁴・茂木 映治⁵ Yukiyoshi ITO, Tomonori SHIMADA, Hiroshi YOKOYAMA, Akira SAKANO and Eiji MOKI

¹正会員(株)建設技術研究所東京本社 水理センター(〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪 1047-27)
²正会員(独)土木研究所 寒地土木研究所 寒地河川チーム(〒062-7602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)
³正会員(独)土木研究所 寒地土木研究所 水環境保全チーム(〒062-7602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)
⁴正会員(独)土木研究所河川・ダム水理チーム(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)
⁵正会員(株)建設技術研究所北海道支社水工室(〒060-0003 札幌市中央区北3条西3丁目1-6 札幌小暮ビル)

The objectives of this study are not only to verify the reproducibility of the scale model compared with the on-site overflow experiment results at Chiyoda experimental channel in 2009, but also to investigate the mechanism of levee breach caused by the overflows.

A model scale is 1/20. Therefore, the model material size of sand for the riverbed is 0.55mm of average particle diameter, based on actual-size 11mm. By adapting the cohesive material model, the phenomena of the levee breach, such as destructive embankment figures, destructive speed, deformation of riverbed material, are detected.

The results are that 1) measured the upper limit of diversion flows under the extreme levee's destruction wide-width, and 2) observed and immediately re-filled the flashed hollows of levee's toe of slope.

Key Words: levee breach by overflow, Chiyoda experimental channel

1. はじめに

堤防破壊の要因の 8 割以上を占める越水破堤のメカニ ズムや水理現象は未だ未解明部分が多く,これらを解明 することは、「洪水ハザードマップの精度向上」それに伴 う「洪水時の避難計画の策定」「水防拠点の必要規模の算 定」等に寄与し、非常に重要な河川計画上の課題である.

特に,河道場の条件(河道幅・河床勾配・湾曲率)や 堤防条件(断面形状・堤体土質・堤内地盤高),水理条件

(本川流量・水深・Fr 数)等の違いにより,破堤による 氾濫量や堤防破壊速度,また,落堀や土砂堆積状況を精 度よく推定することができれば,再現する氾濫シミュレ ーションモデルの精度を大きく向上させることが可能と なり,前述の河川計画上の課題を解決するのに役立つ.

これまで、十勝川千代田実験水路(以下、千代田実験 水路)の実物大河川実験施設を利用して、横断堤形状に おける越水による堤防破壊・拡幅過程の研究¹⁾が行われ てきており、島田・渡邊・横山らは堤防の越水開始から 破壊・拡幅過程における破堤現象を考察しているが、流れ に対して横断的な堤防破堤現象を解析しているのみで、 河道の流れが顕著な縦断的な堤防破堤現象の解析に至っ ていない. また,藤田らは堤防決壊口の拡大過程についてスケー ル模型実験により現象を再現し²⁾,その実験結果を用い て辻本らは破堤口拡大過程のシミュレーションモデルを 作成し,再現性を確認しているが,実物大実験もしくは 堤防破堤被災での検証が必要と考える.

辻本らの研究では、破堤過程を4段階に分割して分か り易く説明し³、堤体面積や堤内地地盤高、湾曲による 破堤に対する影響の評価⁴も行い、堤防の破壊現象を総 合的に説明している.このモデルを用いて刈谷田川や五 十嵐川の洪水破堤現象を再現し、実現象をよく再現し得 たと述べているが、洪水終焉後の姿と比較しているため、 破堤過程が再現できているかまでは不明である.

前述のように3次元的越水破堤メカニズムについて未 解明な部分が多いことからも、2009年度は千代田実験水 路内に土堤を築いて堤防破壊実験を実施した⁵⁾.この結 果,越水破堤について多くの実験研究を行ってきた土木 研究所の実物大2次元破堤実験⁶⁾では得られなかった知 見として、堤防越水部からの縦断的な破壊範囲や破壊速 度、堤体の崩壊状況の可視化、破堤部の分流状況などを 確認することができた.2009年度の実験では越水から破 堤拡幅過程の初期段階を把握することを目的に、氾濫域 を拘束した実験条件であり、2010年度以降は新水路全体 を用いて氾濫域を考慮した実験を実施する予定である.



図-1 縮尺 1/20 の千代田実験水路全体模型,模型値,ケース 2-1~2-6 実験時形状

千代田実験水路での研究は実物大実験としたことで得 るものが多いが、大規模のため実験準備・計測等で多く の時間と費用を要し、充分な流量が確保できる通水可能 期間も限られており、年間3ケース程度、2年間で合計 5・6回程度が限界である.

以上のことから,破堤に関する河川計画上の課題解決, 破堤シミュレーションモデルの精度向上を目的に,本論 文では,縮尺 1/20 の千代田実験水路の模型を用いて,は じめに 2009 年度に実施された実物大実験の堤防破壊現 象と比較検証して実物大実験と模型実験の相違点を明ら かにすることで模型実験の課題を整理し,次に 2010 年度 に計画されている堤防破壊実験と同条件で実験を実施し, 越水破堤現象を把握することを目的とする.

2. 模型実験の検討概要

図-1 に示す通り、模型規模は、現地千代田実験水路の 縮尺 1/20,再現範囲は 84m (現地 1680m) 区間とした.

移動床範囲は、図-1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る手法を 用いた⁸⁾.

3. 実物大破堤実験の検証

(1)目的と内容

まず、本縮尺模型による破堤現象の再現性を検証した. 具体的には2009年に十勝川千代田実験水路で実施された 実験水路内の縦断堤破堤実験形状⁵⁾を模型で再現し、破 堤現象に相似性があるか検証した.

実験手法は、現地の破堤状況や破堤口拡幅速度が現地 と模型で相似となるように、堤防模型に粘着性を持たせ るためのベントナイトを配合して調整した.

図-2に水路平面形状と代表地点の横断形状を,図-3に



図-2 水路内縦断堤破堤実験(ケース1-1~1-4)形状,模型値(mm)



現地実験の様子 図-3 水路内縦断堤破堤実験,現地と模型実験の様子

現地実験と模型実験の様子を示す.

現地堤防の土質は, 礫分 52%, 砂分 32%, 細粒分 16%, 最大粒径 106mm で,透水係数 1.9×10²cm/s, 締固度 93 程度の砂礫堤防である.

(3)実験結果

実験条件は、表-1に示すようにベントナイト配合率を 変化させ、模型流量 34 リットル/s (現地 60m³/s)を通 水した.ベントナイト配合率 10%の時は破堤速度が速す ぎたのに対し、15%の時は比較的現地の再現性が高かっ たため、15%時のみ再現性を確認するため3回実施した. (以降、現地実験結果と比較するため、全てフルードの

相似則に従い現地換算した値で評価する.) 越流開始から堤防破壊が進行する状況は,現地実験に

越流開始から堤防破壊が進行する状況は、現地実験においても、模型実験においても step1~4 に示すような共

表-1 実験条件

ケース	ベントナイト配合率	模型流量(現地)
1-1	10%	33.5 ^{"yy} /s (60m³/s)
1-2~4	15%	33.5 ^{"yy} /s (60m³/s)



図-4 初期段階の堤防の破壊状況写真,模型写真

通の現象が確認できた.

[step1]

越流水は、切欠部を越えた後、裏法面を、溝を刻み ながら流下する.

[step2]

越流水は切欠部天端をほとんど削らないまま,法尻 部から鉛直に落下するように越流部天端付近まで下刻

(下方侵食)が進む.この時は,堤内地側はハの字に 開いたような洗堀形状となる.

step3

溝が川表側法面に達すると急激に流量が増加し始め、 下刻速度は速くなる.それに従い、側刻(側方侵食) も始まり、主に下流側への流れが顕著になるため、下 流側から洗堀が開始される.

step4

下刻が基盤まで達すると、堤防基盤分での洗堀(落 堀)を形成しながら、下流側に堤防を侵食していく.

この時,本川水路内の流速も増大し,洗堀が進行し, 同時に水路下流部に土砂を堆積していく.

また,水路洗堀および堤体崩壊によって生じた土砂 は,氾濫域に拡散し掃流力を失うと堆積する.

この水路内破堤実験における堤防破壊状況は、次節で述べる氾濫域を広くした背割堤破堤実験でも越水開始から 堤防幅が10m程度まで拡幅するまでは見られた.

現地実験と模型実験での破堤状況を図-5に、通水後の 河床状況を図-6に示す.

堤防侵食形状・土砂堆積状況が実物大とベントナイト配 合比15%の模型実験で良く似ていることが確認できた.

堤防侵食形状, 土砂堆積状況も良似



現地実験の様子模型実験の様子砂礫堤防(ベントナイト15%)図-5現地実験と模型実験での破堤状況の比較
(破堤口幅20m (模型1m)時)

氾濫域



砂礫堤防
(ベントナイト 15%)
図-6 現地実験と模型実験での通水後河床状況の比較



図-7 サーボ式水位計計測位置, 図中寸法は現地値

(4)破堤進行過程の比較

次に越水開始から,破堤口幅が約40mまで拡大するま での間で時系列的に水位を示した図-8内に破堤口幅が 10m,20m,30mに達した時刻を,また表-2に破堤口幅の 拡大時間を明記する.

図-8, 表-2 に示す通り, ある程度破堤口幅が拡幅し, 口幅 10m から 30m まで拡大する(側刻)のに要する時 間は大きな差はないが, 越水開始から 10m まで拡大する

(下刻)のに要する時間は、同じ実験条件でも大きな差 が発生した.

この要因はまだ不明瞭な点があるが,以降に示す要因 が推定できる.

【越水開始から10mまで拡幅する時間差が生じる要因】

・堤防を下方向に侵食する(下刻)には、越流水深が数 mm(現地で数 cm)異なるような僅かな差が影響を受 けると推定できる.それに対し、一度基盤まで侵食が 達し、堤防が側岸方向に侵食が始まると、3m 近くの大 きい水深となり、数 mm の水深差は相対的に大差がな くなってしまう.このため、破堤口幅が10m から30m まで拡幅する時間は水深差の影響は小さかったものと 推定する.

(死地时间、シカ安昇は11ック相以則に化い,昇山しに・)				
ケース	越水開始から 10m	10 から 30m まで拡		
	まで洗堀時間	幅する時間		
	(下刻時間)	(側刻時間)		
1-2	123分	38分		
1-3	100分	33.5分		
1-4	53.5分	25分		
現地	48 分	40 分		

表-2 破堤口幅拡大時間の比較

ケース1-2 越水開始から10m破堤までの時間は同じ条件でも差が大きい



-30 -20 -10 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150 160 170 180 190



図-8 主要地点の水位

以上のように、ベントナイトを配合した堤防模型を用いた縮尺 1/20 模型実験で実物大の破堤進行過程(堤防の破壊過程や破壊状況,河床の洗堀や土砂の堆積状況)を精度良く再現することが確認でき、模型実験を用いて実物大の堤防破壊状況の補足検討が可能なことを確認できた.

しかしながら,破堤口の拡大時間(拡大速度)等は模型ではバラツキが大きく定量的な評価は難しいと考える.

4. 氾濫域を設けた場合の破堤実験

(1)目的と内容

前節では、氾濫域幅が 13m と制限された状態での破堤 実験であったため、氾濫流が堤内地に広く拡散する場合 で観られる破堤現象とは大きく異なると推定できる.

そこで、本年度千代田実験水路で計画している氾濫域 として新水路全体を利用した破堤実験を模型でも再現し て破堤状況を確認した.

(2)水路形状と実験ケース

堤防形状は、図-9に示すように高さ3.0m(切欠部2.5m) と2.5m(切欠部2.0m)、天端幅3m,法勾配1:2で、水路 形状は、実験流量70m³/s、河床勾配1/500で等流水深2.7m になるように、鋼矢板で水路底幅8mまで縮小した.

表-3 広い氾濫域破堤実験 実験ケース,現地値

		,		, ,
ケース	堤防高	実給水量	上流最大	備考
			給水量	
2-1	3. Om	$71 \text{m}^3/\text{s}$	76 m³/s	基本形状
2-2	3. Om	$75 \text{m}^3/\text{s}$	82 m³/s	
2-3	2.5m	67m³/s	71 m³/s	堤防高の違い
2-4	2.5m	59m³/s	62 m³/s	ケース1と比較
2-5	3. Om	37m³/s	53 m³/s	Fr の違い
2-6	3. Om	$72 \text{m}^3/\text{s}$	77 m³/s	破堤区間長い

※上流最大給水量は上流湛水域に貯水された容量が破堤による 水位低下に伴い排水され増加した流量である.



図-9 破堤実験水路形状,堤防高 3.0m の場合,現地値

また背割堤を実験堤防とすることで右岸の新水路幅約 115m と広い範囲が氾濫域となった.

実験は、表-3 に示す条件で実施しているが、模型の再 現性を確認するために、主要な条件では2回実施してい る.

ケース 2-1, 2-2 は、基本形状、ケース 2-3, 2-4 は堤防 高を前節のケース1と同様にした場合、ケース 2-5 は水 路下流端で堰上げを行い、流量を半分にしてFr 数の違い を確認した場合、ケース 2-6 は破堤区間を長く確保して 破堤口拡幅に限界があるか確認した場合である.

(3)破堤特性

堤防の破壊状況は、側刻(堤防の側方向の侵食)が開始されるまでは、前節の実験結果で示した step1~4 と同様な結果となる.これに加えて、破堤幅の拡大が開始されると図-10 に示すように step5~step6 のような状況が確認された.

step5

堤防の破壊状況は、上流方向には水流は衝突しないため、川表側の護岸の侵食や河床高の低下が見られるものの数m程度しか侵食しない.それに対して、下流側の堤防破壊先端部は水路からの水衝部となり堤防の側岸侵食は顕著で、破堤口幅は拡大していく.

step6

破堤口幅がある一定幅(おおよそ 20m 程度)に達する 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) は破堤口幅の半分以下となり,堤防侵食,基盤の洗堀, 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.



図-10 堤防破壊の側岸侵食状況, step5, step6



図-11 破堤部の流速ベクトル図、ケース 2-2、現地値



図-12 破堤部の通水後の洗堀・堆積状況図,ケース2-2

図-11 に示した破堤部の流速ベクトル図より,縦断的な 破堤口幅が約 30m の時の流速が速い有効幅は約 12m,また 破堤口幅が 45m の時,有効幅は約 18m と破堤口幅の 4 割 程度となっていることがわかる.これは、図-12 に示す実 験終了後の洗堀・堆積状況図を見ても,流速の速い部分 は落堀が形成されているが,その上流側は堆積状況が確 認できることからも,一定以上の破堤口幅になると本川 水路からの流れは破堤部で急激に拡散しないことから, 有効な流出幅には限界値があると推定した.









(4) 氾濫量の推定と破堤特性

次に、水位と河床高データより、氾濫量を推定した. 図-13 に示す地点にサーボ式水位計を設置し、実験水路下 流地点で、事前に H-Q 関係を計測して、下流へ流下した 流量を推定した.また、実験水路上流地点では通水後河 床高が通水中一定速度で通水後の河床高(ex:ケース2-2 では-1.35m)まで低下していくと推定し、推定した河床 高と計測した水位より上流流量を算出した.

この上下流の流量の差し引きで氾濫量を算出した.

氾濫量=上流流量-下流流量

図-14に水位と流量の時間変化を示す.

表-4 下方侵食時間と破堤口拡幅速度,氾濫量 (値は全て現地値に換算)

ケース	下方侵食時間	破堤口拡幅速度	氾濫量(率)
2-1	68分	1.31m/分	$55 \text{m}^3/\text{s}(72\%)$
2-2	25分	1.23m/分	$58m^3/s(71\%)$
2-3	40分	1.79m/分	$48m^3/s$ (68%)
2-4	31分	1.79m/分	$41 \text{m}^3/\text{s}(66\%)$
2-5	43分	1.79m/分	$37 \text{m}^3/\text{s}(70\%)$
2-6	64分	1.12m/分	$57 \text{m}^3/\text{s}(74\%)$

また全ケースにおいて、越水開始から破堤口幅が 10m まで達する時間と破堤口拡幅速度が最も大きい時(破堤 口幅が 10m~40m (ケース 2-5 は 20m)まで拡幅する時) の破堤口拡幅速度、最終の最大氾濫量を表-4 に示す.

・破堤口拡幅速度(m/分)=拡幅幅/拡幅に要した時間(分)

その結果,以下の知見が得られた.

a)下方侵食時間はバラツキが大きい

基本形状ケース 2-1, 2-2 と 2-6 は堤防形状・通水量が 同一条件であるため、破堤口拡幅速度は 1.1~1.3m/分程 度で同値となるが、前述のように、側岸侵食が始まるま での時間はケース 2-2 で 25 分と短いのに対し、ケース 2-1 では 68 分、ケース 2-6 では 64 分とバラツキが見ら れた.

b)破堤口拡幅速度

破堤口拡幅速度は堤防断面形状が同じケースである 2-1, 2-2, 2-6 は約 1.2~1.3m/分とほぼ合致しており,堤 防高の低いケース 2-3, 2-4 と流量の小さいケース 2-5 が 1.79m/分と大きい.

ケース 2-5 は流量が小さいので破堤口先端に衝突する 流速は3.5m/s(他のケースは5m/s前後)と小さいにも関 わらず破堤口拡幅速度が大きいのは、流量が小さいけれ ど水深を2.7mまで上げるために実験水路下流で水路幅を 狭くして堰上げているのも要因のひとつと考える.

ケース 2-3, 2-4 のように堤防高が 2.5m と小さいと堤 体断面積が小さいため破堤口拡幅速度は大きくなる. c)氾濫量について

表-4 に示すように氾濫量と上流からの最大流量比を算 出すると、66~74%が氾濫する結果となった.

図-11 に示す時の水深が約1.0m, 平均流速5m/s, 有効 幅 18m とすると氾濫量は90m³/s となり,実態の58m³/s の 1.5 倍になってしまうので破堤部の氾濫量は単純に「水深 ×断面積」で推定するのは困難である.

d) 最大破堤口幅について

図 14 に示すように,ケース 2-5,2-6 では破堤口の拡幅がほぼ止まり,氾濫量が一定となった.

ケース2-5 で30m, ケース2-6 で70m まで拡幅ところで, 堤防の拡幅はほぼ停止した.またその破堤ロ幅の約半分 ケース2-5 で15m, ケース2-6 で40m 付近までは,一定に 短時間で拡幅しているが,その後拡幅速度は低下するこ

とがわかった.

5. まとめと今後の予定

以上より,現地破堤実験を再現した模型実験から得ら れた知見を以下にまとめる.

- ・縮尺1/20模型で,実大実験の破堤現象について,破 堤状況,洗掘堆積状況,破堤部の流況を再現するこ とが確認できた.
- ・越水初期の基盤まで下方侵食(下刻)する時間は、 初期越流水深や越流部天端の締め固め等の僅かの差で、数倍の違いが発生する。
- ・破堤口部の側岸侵食幅は当初はほぼ一定速度で広が っていくが、その後緩和され、最終的には終焉する 傾向がある.
- ・本実験条件では破堤口部の拡幅が進行しても、流速 のある有効幅や氾濫量には上限があると考える.

2010 年度は、千代田実験水路において新水路を氾濫域 としたケース 2 シリーズの実験が実施され、本模型実験 で得られた結果と比較検証する予定である.千代田実験 水路で得られた知見を元に、実物大実験では実施できな い様々な条件での破堤補足実験を模型で実施することで、 氾濫シミュレーションモデルの精度向上に寄与できるも のと考えている.

謝辞:本論文の作成にあたっては、北海道開発局帯広開 発建設部よりデータの提供を承った.ここに記して感謝 の意を表する.

参考文献

- 1)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.
- 2)藤田裕一郎,田村多佳志,村本嘉雄:河川堤防決壊口の拡大過 程に関する実験的研究,京都大学防災研究所年報第 27 号 B-2, pp. 527-549, 1987.
- 3) 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.
- 4) 辻本哲郎, 北村忠紀, 岸本雅彦:砂質堤防の破堤口拡大過程の シミュレーションと破堤水理,河川技術論文集,第8 巻, pp. 31-36, 2002.
- 5) 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. 811-816, 2010.
- 6)橋本宏,藤田光一他:越水堤防調査最終報告書-解説編- 土木 研究所資料第2074号 建設省土木研究所河川研究室,1984.
- 7) 島田友典ほか: +勝川千代田実験水路の基礎的な土砂挙動特性, 土木学会応用力学論文集, vol. 11, pp. 699-707, 2008.)
- 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.

(2010.4.8受付)