

千代田実験水路における横断堤越水破堤実験

CROSS-LEVEE BREACH EXPERIMENT BY OVERFLOW AT THE CHIYODA EXPERIMENTAL CHANNEL

島田友典¹・渡邊康玄²・横山洋³・辻珠希⁴

Tomonori SHIMADA, Yasuharu WATANABE, Hiroshi YOKOYAMA and Tamaki TSUJI

¹ 正会員 独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所 (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

² 正会員 工博 北見工業大学 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 独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所 (〒 062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目)

⁴ 非会員 国土交通省北海道開発局帯広開発建設部 (〒 080-8585 帯広市西 4 条南 8 丁目)

Mechanism of levee breach of three-dimensions by overflow is not clarified. It is important to clarify problem. Experiments of levee breach in three-dimensions by overflow using the Chiyoda Experimental Channel will start in 2009. As its preparation step, we carried out an experiment of breaching process of lateral over flow across levee by overflow for verification of measuring equipment etc. We established measurement to the time series levee breach using scale model experiment together. We clarified about breaching process of full-scale levee.

Key Words: Chiyoda experimental channel, Cross-levee breach by overflow, Breaching process

1. はじめに

近年, 台風や集中豪雨などによる豪雨災害が多発しており, それに伴い堤防の決壊事例も見られるようになってきている。破堤による被害は甚大であり, その 8 割以上が越水に起因するものであるとされている¹⁾。

越水破堤に関する研究は様々な手法で進められており, それらを整理したものが表-1 である。研究手法を大別すると実験・現地調査・数値計算となる。まず実験による手法は 2・3 次元的な実験に二分できる。2 次元的な実験(堤外河川の流れを考慮しない正面越流)は更に実スケール・スケールモデルに分類でき, 3 次元的な実験(堤外河川の流れを考慮した横越流)はスケールモデルのみである。次に現地調査による手法は最終的な破堤形状等のみ把握可能であり, その過程を解明することは困難である。最後に数値計算による手法は既往の実験や現地調査の結果との比較は可能であるが, 実スケールでの 3 次元的な破堤の拡がり過程やその時の水理特性が明らかになっていないため, 比較検証を行うデータの蓄積がモデル精度の向上には重要である。

以上のことから, 越水破堤に関する研究の発展には, 実スケールにおける 3 次元越水破堤メカニズム(破堤のきっかけ・破堤幅の拡がり過程・落ち掘れの形成過程・水理特性など)を時系列で把握することが非常に重要であると言える。

現在, 国土交通省北海道開発局, 寒地土木研究所では実スケールの実験水路として, 十勝川千代田実験水路(以下, 千代田実験水路)を用いた実験を行っている¹⁶⁾¹⁷⁾。前述の課題を明らかにすべく, 2009 年度より実

スケールにおける横越流による 3 次元越水破堤実験を計画しているところである。しかしながら実験規模が非常に大きく, 観測が広範囲で且つ計測項目が多岐にわたることから, 2008 年度は計測機器の機能検証や計測手法の確立を目指し, 千代田実験水路内に横断堤を造成し正面越流による 2 次元越水破堤実験を行った。

実験では横断方向への破堤拡幅過程や落ち掘れ形状が計測できたことから, 千代田実験水路の位置づけを明らかにするため既往の成果との比較を行った。更に正面越流による 2 次元越水破堤ながら, 今まではスケールモデル実験で推測の域を出なかった横断方向の破堤拡幅過程について明らかにすることが出来た。なお計測が困難である流水下で破堤履歴の計測手法を確立するため, 事前に室内実験も行った。

2. 室内実験(破堤履歴の計測手法検討)

千代田実験水路を用いた越水破堤実験を行うにあたり, 重要且つ課題となるのは破堤進行過程を時系列で把握することである。ゲートは操作規則上すぐに通水を止めることが出来ないため, 破堤進行中にその過程を計測する必要がある。計測手法の選定とその精度把握を目的に, 複数種のセンサーを用いて室内実験を行った。

(1) 室内実験の概要

計測手法として表-2 に示したセンサーを選定した。各センサーは堤体内に設置し, 加速度センサーは設置箇所が破堤し流出することで加速度が発生, また水温

表-1 越水破堤に関する既往の研究事例

研究手法	規模	キーワード	研究事例調査	研究概要	成果概要	課題点
実験	実物大	越水破堤メカニズム	現地破堤実験 ²⁾	越流の耐侵食性に関する実物大研究	芝堤の耐侵食強度の評価、もぐら穴弱点部の侵食形態	破堤の3次元的拡大現象
		耐越水化対策	越水対策実験 ³⁾	様々な耐越水工法の比較検討	土堤の破壊メカニズムの解明、危険度別耐越水対策工法の選定方法提案	越水堤防化する必要のある範囲の選定方法
		越流部水理特性	越流時の水位・流速計測	上記の耐越水化対策実験に併せて実施	2次元越流水理特性の把握	3次元越流特性は不明
	縮尺模型	越水破堤メカニズム	遠心模型実験 ⁴⁾	遠心模型による越流破壊実験	縮尺模型での堤体内の流れが再現可能	相似性について研究が必要
			堤防決壊口拡大状況 ⁵⁾	縮尺模型による堤防決壊口の拡大状況再現実験	堤防決壊後の拡幅速度と水理現象の把握	研究事例が少ない
		耐越水化対策	特殊な耐越水化対策 ⁶⁾	堤防法尻の新たな保護工	洗掘防止と氾濫防止を考慮した新たな保護工の提案	費用対効果等、今後実用に向けての検討が必要
		越流部水理特性	坂路がある堤防の越流特性 ⁷⁾	裏法側に坂路がある場合の流れの集中を実験	3箇所の流れの集中箇所が発生、補強方法を提案	研究事例が1ケースのみ
	平面的越流特性 ⁸⁾	堤防越流水理特性 ⁸⁾	底面圧力・流速分布・レイノルズ圧力分布の特性把握	2次元実験による越流水理特性把握		越流時の裏法部における水理特性を精度よく再現計算できるモデルの検討が必要
			平面的越流特性 ⁹⁾	河川堤防からの越水状況を再現する計算モデルの構築	SU-FUF-2DF ダイナミック氾濫解析モデルで良好に再現	実スケール等での検討が必要
			氾濫拡散状況	樹木部による被害軽減効果 ¹⁰⁾	樹木部による破堤決壊拡幅抑制効果の検討実験	樹木部を堤内地に設置することにより堤防決壊拡幅を抑制することを確認
調査	被災時	被災事例・要因分析	水害レポート ¹¹⁾	現地被災事例の収集と要因分析	現地での被災事例・効果的な堤防強化方法の提案	被災時のリアルタイムな外力情報は事後調査のみでは把握困難
			災害調査方法 ¹²⁾	越水破堤被災後調査と外力解析	被災後痕跡調査でも定量的に出水時の外力推定が可能	他河川への汎用のための追加調査必要
数値計算	越水破堤メカニズム	破堤拡大過程 ¹³⁾	破堤拡大過程の計算モデルの開発	破堤決壊口の拡大状況・落掘・土砂堆積状況の再現	実物大での検証が必要	
		越流破壊 ¹⁴⁾	堤防越流破壊現象の計算モデル化・越水外力を増大させる要因解析	拡張 MPS 法により単純な条件下なら破堤現象の再現可能、越水外力へ影響を与える要因解析	基礎研究段階	
	氾濫解析	実洪水を再現した氾濫解析モデル ¹⁵⁾	数値計算による洪水氾濫状況の再現	氾濫解析モデルの提案	破堤箇所境界条件等は不明	

表-2 センサー諸元

	加速度センサー	水温センサー
製造会社	米国オンセット社	
型番	UA-004-64	UTBI-001
計測範囲	± 3G	-20~30 °C
精度	± 0.075G	± 0.2 °C
分解能	0.025G	0.02 °C
時間精度	± 1 分/月	± 1 分/月
寸法/重量	58× 33× 23 mm/18g	30× 40× 17 mm/23g

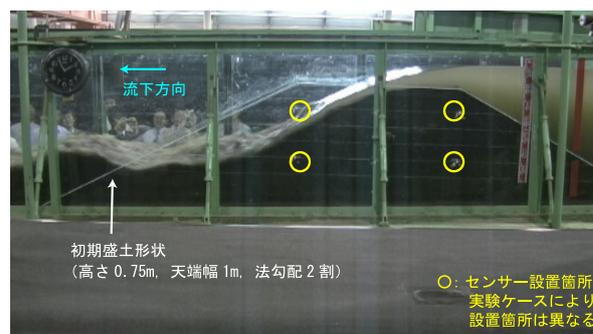


図-1 室内実験の状況

センサーは流出することで堤体内と流水の温度の違いにより水温変化が発生すると考え、それぞれの値を時系列で記録し、値の大きな変化点からその地点の侵食を把握しようとするものである。なお共に自記式であるため実験終了後にセンサーを回収しデータを取得する必要がある。各センサーは同項目を計測出来るものが種々あるが、千代田実験水路では堤体内に数多く設置する予定であることから、小型・無線・安価であることを基本とし総合的に判断し選定を行った。

室内実験は寒地土木研究所が所有するガラス製水路(幅1.0m×高さ1.0m×長さ23m)を用いて行った。図-1に示したように水路内全幅に盛土し、側面からセンサーが目視できるように配置した。実験は盛土上流部に一定時間、堪水させたのち流量を増加し破堤させ(全4ケース:各センサーの使用累計数26個)、目視により流出した時刻とセンサーの記録時刻を比較することで、センサーの精度検証・現地での適用の可能性を確認した。

(2) 室内実験の結果

一例として各センサーの結果を図-2に示す。加速度センサーは実流出時刻の5秒後にセンサーの反応が確認できる。水温センサーは堤体内への流水の浸透の影響を受け徐々に反応が始まり、流出時刻付近で再度、反応を示しているが秒単位での流出時刻推定は困難である。

千代田実験水路は屋外での実験であるため、通水中の気温変化・降雨等の気象条件より未破堤箇所でも水温センサーが反応する可能性が考えられ、また破堤時刻の推定は数分単位が限界であることから、今回の実験目的には不適合であると判断された。

次に加速度センサーの精度検証を行う。図-3は加速度センサーの目視による流出時刻と、センサーが記録したデータから推定時刻の誤差を示したものである。こ

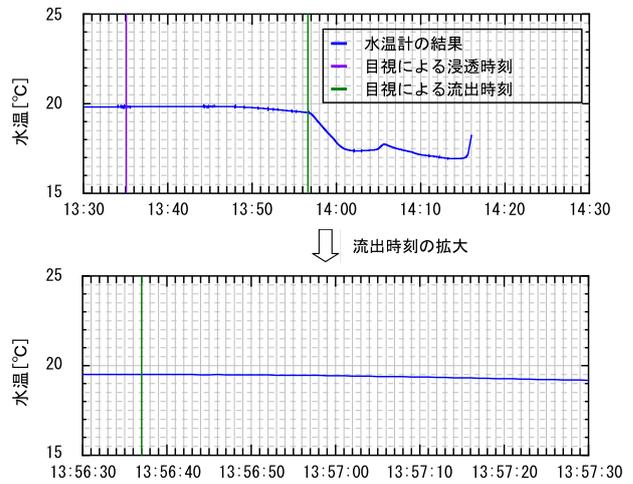
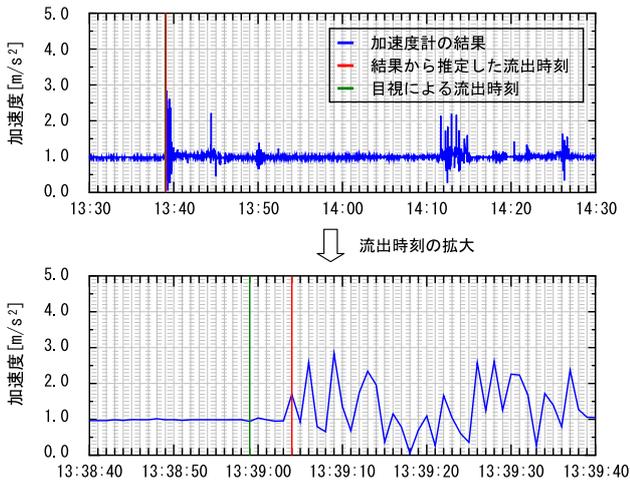


図-2 室内実験結果の一例 (左; 加速度センサーの結果・右; 水温センサーの結果)

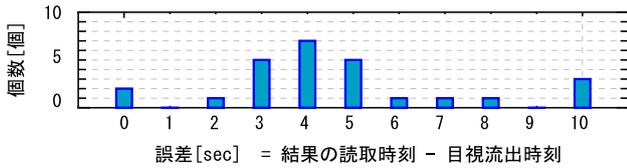


図-3 加速度センサーの誤差分布

れより数秒単位の誤差での破堤時刻推定が可能であると考えられ、今年度の千代田実験水路における横断堤破堤実験では加速度センサーをメインとし、現地での適用性確認を行うこととした。

3. 千代田実験水路での破堤実験

(1) 現地実験の概要

8月15日に実施した千代田実験水路での横断堤破堤実験の概要を図-4に示す。高さ2.5m、天端幅2m、法勾配2割の横断堤を水路全幅(下幅30m、上幅40m)において造成した。また破堤のきっかけとして天端中央に幅5m、深さ0.05mの切欠を設けた。用いた土砂は千代田新水路工事で発生した残土であり、土質試験結果は図-5の通りである(現地河床材料と概ね同じ土質)。

通水中の主な観測は水位観測(水位計)、状況撮影(カメラ・ビデオ)、破堤形状の時系列計測(加速度センサー)であり、通水後には堤防・落ち掘れ形状の測量(三次元レーザースキャナ)を行った。

通水は高さ2.25mまで堰水させ10分間の通水停止後、 $4\text{m}^3/\text{s}$ を通水し横断測線方向への破堤幅が概ね落ち着いた時点で実験を終了した。ここで通水流量 $4\text{m}^3/\text{s}$ は過去の事例³⁾等から判断して決定した(越流量と越流水深の関係から切欠箇所での越流水深は概ね25cm程度)。なお通水再開時の水路内推定流速は概ね $7\text{cm}/\text{s}$ (堰水時の水路内横断面積と通水流量 $4\text{m}^3/\text{s}$ より算出)、また実験状況から流水による堤防表法の侵食等が見られ

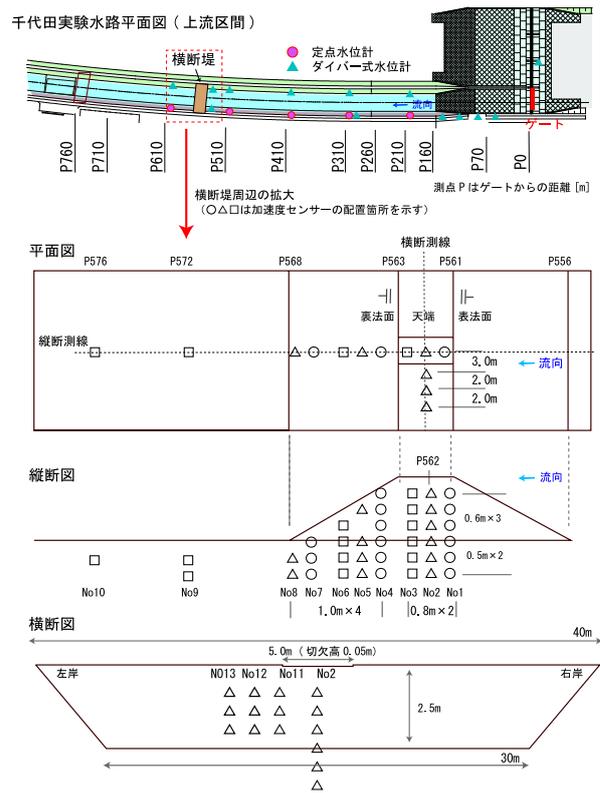


図-4 千代田実験水路での越水破堤実験概要

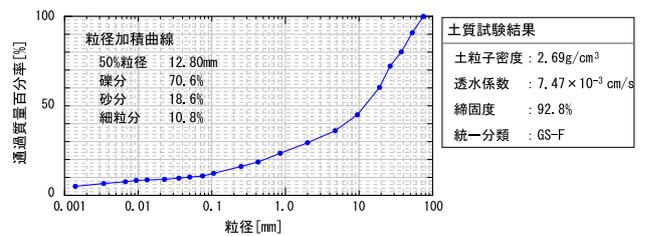
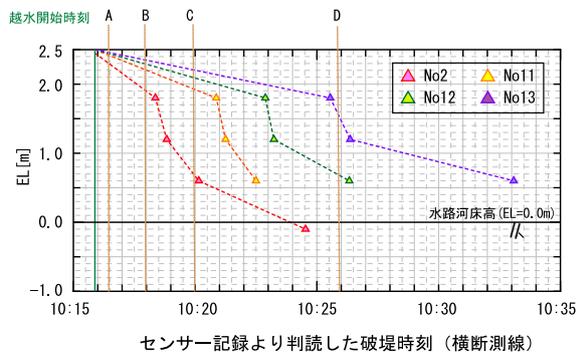
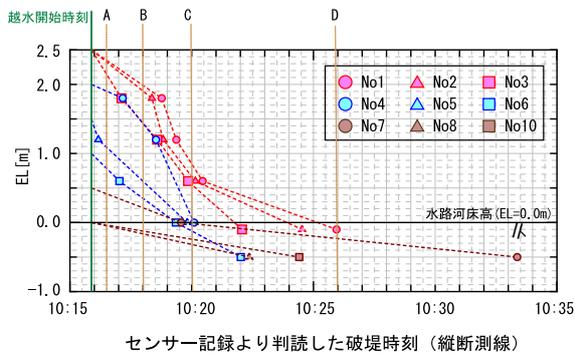


図-5 盛土材の粒度分布・土質試験結果

なかったことから、水路内流速による破堤への影響はなかったと考えられる。



初期堤体形状 ●▲■ センサー配置箇所 (ただしグレー着色部はセンサー未流出、白抜きは流出したが回収が出来ずにデータ取得不可を示す)
 推定破堤時刻 10:16:30(A) 10:17 10:18(B) 10:19 10:20(C) 10:21 10:22 10:23 10:24 10:25 10:26(D)

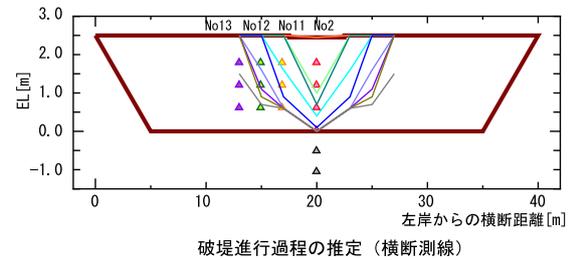
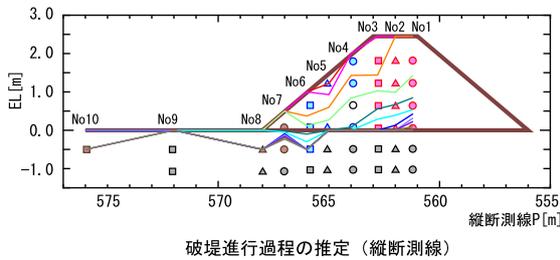


図-7 加速度センサーの記録を用いた破堤進行過程の推定 (左; 縦断測線上・右; 横断測線上)

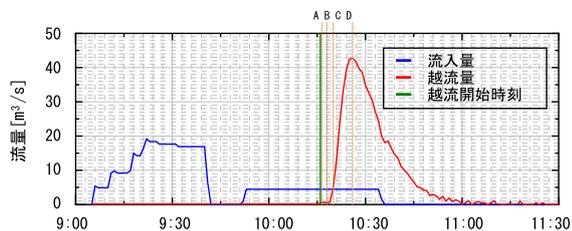


図-6 越流入量・破堤の進行状況

(2) 現地実験の結果

a) 越流量の推定・破堤進行概要

ゲートからの水路内流入量と堤防上流区間の水位結果を用いて、(1)式より堤防からの越流量を推定した。

$$Q_{out}(t) = Q_{in}(t) - (V(t) - V_{(t-1)})/\Delta t \quad (1)$$

ここで Q_{out} :越流量, Q_{in} :流入量, V :横断堤上流部の堰水体積, Δt :水位計データは1分毎なので60secである。

図-6の上段は流入量と(1)式より求めた越流量を示す。なお累計越流量は40,000m³程度であり、概ね累計流入量と一致していた。

また下段は実験時に撮影したビデオ画像である。堤防からの越流開始は10時16分頃からであり、越流開始直後である時刻Aでは裏法面全体にガリ侵食が見られる。時刻Bは越流開始から2分後であり、裏法面の侵食が鉛直方向に進行し、また天端部侵食が開始している。時刻Cは越流開始から4分後であり、縦断測線上の堤防部分が概ね全崩壊しこれ以降、横断測線方向へ破堤が拡幅していく。時刻Dは越流開始から10分後であり、越流量ピーク(42.74m³/s)をむかえている。この破堤過程は堤防の土強度が弱い(細粒分が少ない)と言われている場合と一致³⁾⁴⁾しており、これより今回の実験は土強度が弱い条件下であったことがわかる。

b) 破堤の進行状況 (縦断測線方向)

図-7の左上は縦断測線上に配置したセンサーの記録より判読した破堤時刻である。ここで縦軸は水路河床を基準高0mとし、越水開始時刻ではそれぞれのセンサー配置箇所における堤防高を示している(No.1~3は天端箇所なのでEL2.45・No.4~7は各箇所の法面高・No.8及びNo.10は水路河床なのでEL0.00)。越水開始時間以降はセンサーの設置高と破堤時刻をプロットしている。図-7の左下はセンサー設置箇所の破堤時刻を用いてセンサー間は直線補間とし、時刻A~Dにおける1分毎の破堤進行過程を推定したものである。

越水開始から時刻Bにかけて、裏法面部全体と裏法肩付近が崩壊している。次に時刻B~Cの間では天端箇所において下流側から順次、鉛直方向下方にむかって崩壊が進み、時刻Cで河床高より上の堤体部分の大半が崩壊している。またこの時間帯のうちに、法面部は河床高まで全て崩壊している。時刻C以降については天端箇所についても河床高まで下流側から順次崩壊

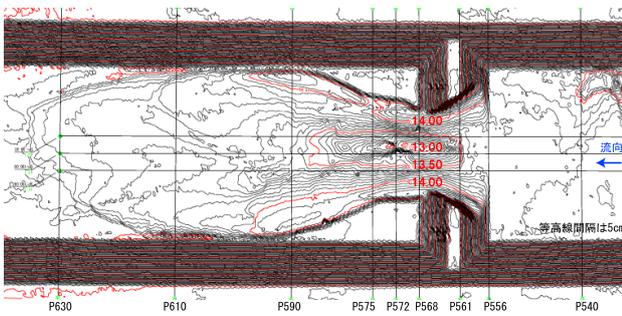


図-8 実験終了後の形状平面図(等高線図)

している。更に法尻から下流では河床高より低い部分についても流出しており、時刻C前後、つまり縦断測線上の堤防崩壊が概ね終了する時刻前後より落ち掘れの形成が始まったと推定することが出来る。

c) 破堤の進行状況(横断測線方向)

図-7右はセンサー記録を用いた横断測線上の破堤進行過程である。表記方法については縦断測線方向の結果と同じである。なおセンターより右岸側にはセンサーの配置はしていないが、実験状況の目視観測で左右岸対称に崩壊が進んでいたことを確認していることから、左岸の結果を用いて右岸の崩壊過程を推定している。

堤防センターに配置したNo.2において天端より2m程度崩壊が進んだ後、No.11の崩壊が開始している。No.11が天端より鉛直方向下方2m程度崩壊が進んだ後、No.12の崩壊が開始している。また両箇所とも天端から鉛直方向下方1.5m程度はほぼ同時期に崩壊している。実験時、及び撮影状況からも横断方向への破堤の拡がり過程は次のことが言える。例えばNo.11に注目すると、近傍のNo.2の下層が削られることにより不安定となり、No.11の上部が塊となり崩壊、次にNo.11の下層が削られることにより不安定となり、No.12の上部が塊となり崩壊、といったことを繰り返しながら破堤拡幅が進行していると言える。これについては後述の破堤の拡幅過程で検討を加える。

d) 破堤の最終形状

図-8は実験終了後の形状を三次元レーザースキャナ、及び洗掘箇所の堪水部ではトータルステーション(トランシットと光波測距儀を一体化した測量機器)を用いて計測した結果である。堤防の破堤部開口形状は表法側が大きく開いた八の字をしており、また落ち掘れの最大洗掘深の発生箇所は等高線の絞り込まれた裏法尻近傍にあり、既往の室内実験結果⁵⁾と一致している。

図-8より、落ち掘れの形状は延長Lが約28m、最大洗掘深Dが約0.8m、また堤防の天端開口幅Bは約18mである。図-9はこれらの形状特性を既往の室内実験(最終破堤形状に至るまでの実験過程も含む)、及び現地資料(実災害時)⁵⁾について比較したものである。今回の実験結果を比較するとその範囲内に収まっていることがわかる。但しこれは最終形状についての検討結果であり、室内実験ではこの形成過程についての検討が進め

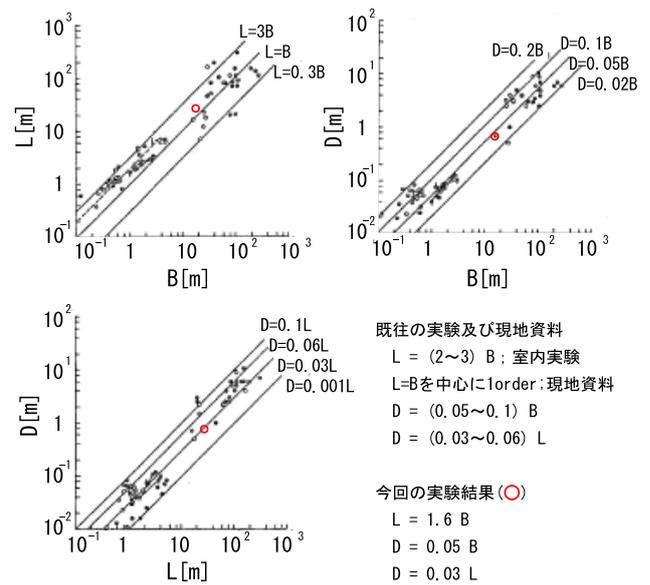


図-9 落ち掘れの形状特性⁵⁾

られているが、現地資料では把握が不可能なため、今後、千代田実験水路では落ち掘れの形成過程把握を行うことが重要であると言える。

4. 破堤の拡幅過程

破堤の拡幅過程について、スケールモデル実験で天端の破堤開口幅の結果を用いた検討事例⁵⁾はあるが、堤防内部の破堤過程まで含めた詳細な検討を行なった事例は少ない。今回の実験では堤防天端拡幅過程をビデオ撮影より、堤防内部の破堤過程を加速度センサーによりデータの取得ができたため、以下では破堤の拡幅過程について検討を行なう。

図-10の上段は単位幅越流量を示す。越流幅をここでは堤防横断測線上から越流した水面幅と同じと仮定した。下段は堤防天端が横断方向に崩壊した開口幅、及び時間当たりの開口幅変化率(dB/dt)を示したものである。これらの幅はともにビデオ画像から1分毎の値を読み取ったものである。

まず開口幅の進行過程について、横断方向拡幅初期の2分程度は緩やかに進行しているが、時刻C以降、拡幅が急激に進行している。そして時刻D以降は拡幅が緩やかとなりその後、一定値へと落ち着く。既往の実験では特に初期の拡幅について天端幅が広いほど、緩やかな拡幅時間が長く続くと言われている。耐越流性を持ち始める天端幅は4~7mと言われており³⁾、また河川管理施設等構造令によると流量規模に応じて天端幅は3~7mとなっている。これより今回の実験では天端幅が2mであったこともあり、横断方向拡幅初期の緩やかな時間帯が短かったと考えられる。

次に開口幅変化率が最も大きいのは越流量ピークの時間D、及び単位幅流量ピークより以前に発生している。藤田ら⁵⁾は破堤の拡がり過程は掃流作用ではなく

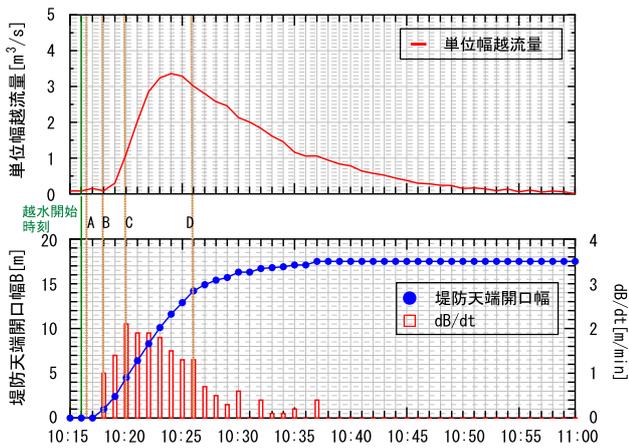


図-10 (上段) 単位幅越流量・(下段) 破堤拡幅過程

堤体が鉛直方向下方に崩壊が進み、これにより周辺土砂が不安定な状態となり拡幅が進むと推定している。

今回の実験では時刻 C で開口幅変化率の最大値が現れている。時刻 C は図-7 に示したように、縦断測線上において堤体の大半が崩壊している時間である。このため周辺土砂が不安定となり、急激に横断方向への拡幅が進んだと考えられる。また 10:30 までは開口幅変化率の結果より連続的に拡幅が進行しているが、10:30 以降、藤田らが指摘したように間欠的な拡幅が確認できる。図-7 の No.13 で堤体下方が崩壊した時刻 (10:33) から 3 分後には 2m/min の開口幅変化率が現れており、既往の推測の域から実スケールの実験結果として確認することが出来た。

今回は実スケールの実験で堤防内部も含めた進行過程を計測することが出来たことにより、横断方向への破堤メカニズムについて一知見を得ることが出来たと言える。

5. おわりに

本論文では計測が困難である流水下での破堤履歴の計測手法検討結果、実スケールでの横断方向拡幅が再現できる正面越流による 2 次元越水破堤実験結果について述べた。これより次のことが明らかとなった。

1. 加速度センサーを用いることで、実スケールで通水を止めることなく不可視部分の破堤過程を計測する手法が確立できた。
2. 千代田実験水路で形成された落ち掘れの形状特性について、既往事例の範囲内であった。これは今後、千代田実験水路での越水破堤実験で得られた知見を、他の研究について反映可能であると言える。
3. 横断方向への拡幅過程は掃流作用ではなく鉛直方向下方に崩壊が進み、周辺土砂が不安定な状態になることで拡幅が進むことがわかった。これは既往の研究では室内実験結果の推測にとどまっていたが、実スケールでその現象を捉えることが出来た。

なお、破堤拡幅過程は正面越流による 2 次元実験のため決壊口から対称に進行したが、実現象では横越流のため破堤軸の傾きや非対称に拡幅が進む可能性があり、これらについては次年度以降の 3 次元実験で明らかにする予定である。

謝辞：十勝川千代田実験水路での実験実施にあたっては十勝川千代田実験水路実験検討会から助言を多く頂いた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 吉川勝秀：河川堤防学，技報堂出版，pp.98，2008.
- 2) 例えば，北川明ほか：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，土木学会水工学論文集，第 39 巻，pp.489-494，1995.
- 3) 例えば，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.
- 4) 例えば，木村勝行ほか：越流に伴う破壊現象に関する研究，ダム工学会論文，No.35，pp.215-223，1999.
- 5) 例えば，藤田裕一郎ほか：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第 2 部，第 42 回，pp.559-560，1987.
- 6) 例えば，奥田浩司ほか：排水機能を持つ堤防裏法尻保護工に関する実験的検討，土木学会水工学論文集，第 51 巻，pp.751-756，2007.
- 7) 東高德ほか：堤防形状 3 次元性を考慮した対越水堤防強化，土木学会年次学術講演会第 2 部，第 55 回，pp.338-339，2000.
- 8) 例えば，田中祐一朗ほか：河川堤防の越流に関する研究，土木学会年次学術講演会第 2 部，第 48 回，pp.424-425，1993.
- 9) 重枝未玲ほか：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，土木学会河川技術論文集，第 11 巻，pp.169-174，2005.
- 10) 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.
- 11) 例えば，辻本哲郎ほか：矢作川および境川流域における 2000 年 9 月豪雨災害，土木学会河川技術論文集，第 7 巻，pp.71-76，2001.
- 12) 福岡捷二ほか：越水を伴う洪水流による堤防被災機構の調査およびその解析，建設省土木技術資料 30-3，pp.21-26，1988.
- 13) 例えば，辻本哲郎ほか：破堤拡大過程と河川特性の関係について，土木学会河川技術論文集，第 11 巻，pp.121-126，2005.
- 14) 例えば，後藤仁志ほか：越流水による河川堤防浸食過程のグリッドレス解析，土木学会水工学論文集，第 46 巻，pp.439-444，2002.
- 15) 例えば，大坪郁宜ほか：東海豪雨を対象とした氾濫解析，土木学会河川技術論文集，第 7 巻，pp.35-40，2001.
- 16) T. Shimada et al. : Basic hydraulic characteristic of the Chiyoda experimental channel, River Flow 2008, Vol.3, pp.1805-1813, 2008.
- 17) 島田友典ほか：十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.

(2008.9.30 受付)