

千代田実験水路における横断堤を用いた越水破堤実験

寒地土木研究所 寒地河川チーム ○島田 友典
寒地土木研究所 水環境保全チーム 横山 洋
帯広開発建設部 治水課 辻 珠希

越水破堤に関して実スケールでの3次元越水破堤メカニズムは未解明である。これらを明らかにすることは今後の越水破堤に関する研究の発展にとって非常に重要である。2009年度より十勝川千代田実験水路において、実スケールの3次元越水破堤実験を行う予定である。2008年度は計測機器の検証等を目的とし、十勝川千代田実験水路で横断方向への拡幅過程や落ち掘れが再現可能な実スケール2次元越水破堤実験を行った。この結果より横断方向への拡幅過程について、既往の研究では室内実験結果から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。

キーワード：十勝川千代田実験水路，横断堤越水破堤，破堤拡幅過程

1. はじめに

近年、台風や集中豪雨などに起因す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¹⁾のものであると言われている。

越水破堤に関する研究は様々な手法²⁾で進められているが、破堤過程などそのメカニズム(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)は未解明な部分も多い。越水破堤に関する研究の発展には、とくに実スケール(実物大)での3次元越水破堤メカニズムを時系列で把握することが非常に重要である。またこれらが明らかとなることで、破堤後における堤防復旧等の危機管理対策技術の向上やハザードマップの精度向上など、行政への還元も期待ができる。

現在、北海道開発局と(独)土木研究所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³⁾⁴⁾。2009年度より実スケールにおける3次元越水破堤実験(堤外河川の流れを考慮しない正面越流)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も、2008年度は計測機器の機能検証や計測手法の確立を目的に、千代田実験水路内に横断堤を造成し2次元越水破堤実験(堤外河川の流れを考慮しない正面越流)を行った²⁾⁵⁾。なお実験実施にあたり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。

表-1 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℃(水中)
精度	± 0.075G	± 0.2℃
分解能	0.025G	0.02℃
時間精度	± 1分/月	± 1分/月
寸法/重量	58×33×23mm/18g	30×40×17mm/23g
データ取得	1秒インターバル	
メモリ	64k(3軸で21,800点)	64k(42,000点)

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いかに精度良く把握するかである。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) センサーの選定

計測手法として表-1に示したセンサーを選定した。各センサーを堤体内に設置し、設置箇所が破堤し流出することで加速度センサーは加速度が発生、水温センサーは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、値の大きな変化点から設置箇所の破堤時刻を把握しようとするものである。データ取得インターバルはそれぞれ1秒毎とし、加速度センサーは重力加速度も計測することから3軸方向の加速度を取得し、得られたデータを合成加速度として扱うこととした。

なお加速度、及び水温を計測出来るセンサーは種々あるが、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。

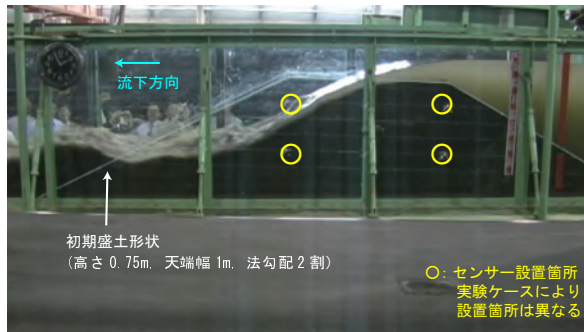


図-1 室内実験の状況

(2) 室内実験の概要

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の堤体造成箇所全幅に盛土し、センサーを側面から流出状況が目視できるように配置した。実験は堤体上流部に一定時間、堪水させたのち流量を増加し破堤させ、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(全 4 ケース: 各センサーの使用累計数 26 個)。

(3) 室内実験の結果

図-2 に結果の一例を示す。加速度センサーは実流出時刻の 5 秒後に反応が確認できる。水温センサーは堤体内への流水浸透の影響を受け徐々に反応が始まり、流出時刻近辺で再度、大きな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の施設であるため、気象条件等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した流出時刻の誤差を示したものである。こ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。

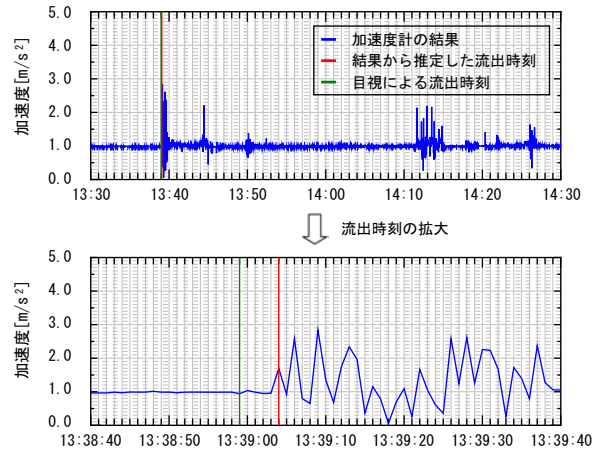
3. 千代田実験水路での破堤実験

(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(実験水路河床材と概ね同じ土質)。

通水中の主な観測は水位計による水位観測、室内実験結果より選定した加速度センサーによる破堤形状の時系列計測、ビデオカメラを用いた実験状況撮

加速度センサーの結果



水温センサーの結果

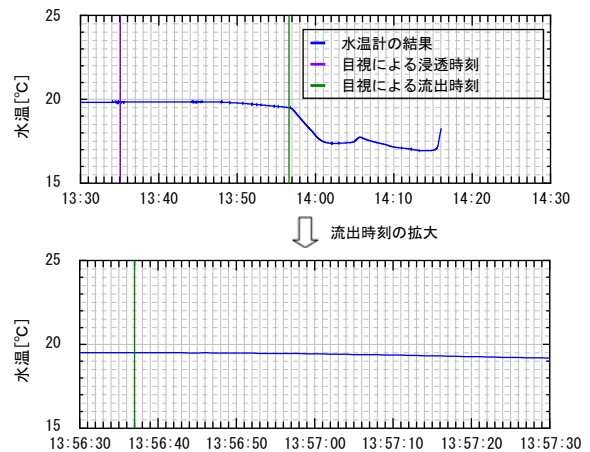


図-2 室内実験結果の一例

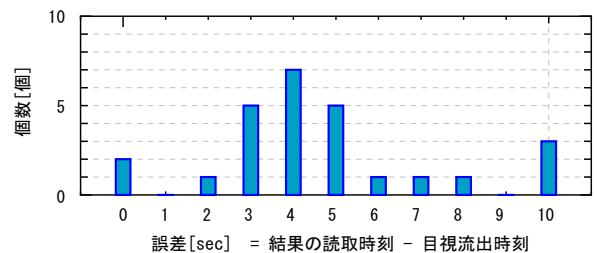


図-3 加速度センサーの誤差分布

影、また通水後には三次元レーザースキャナによる破堤部周辺形状の測量を行った。また図-6 に示すとおり、実験状況を記録するため様々なアングルからビデオカメラを用いて撮影を行った。

通水は堤防の高さ 2.25m まで堪水させ 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拡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⁶⁾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 7cm/s(堪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

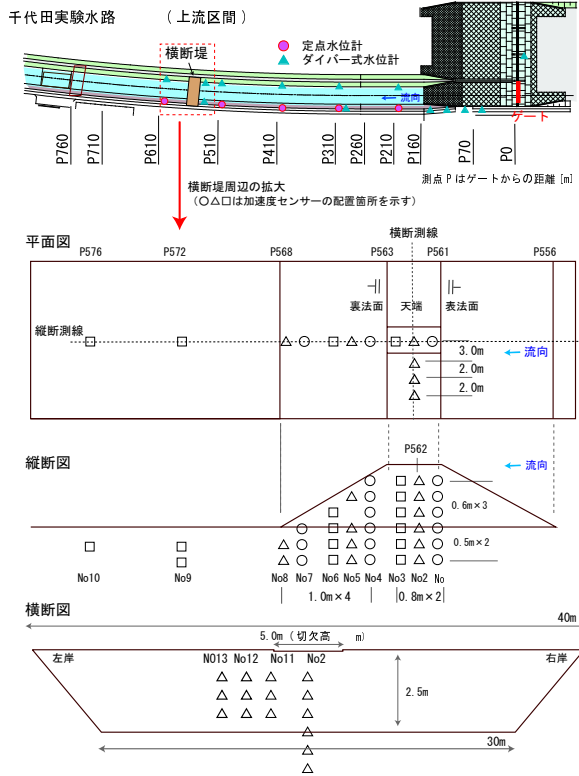


図-4 千代田実験水路での越水破堤実験概要

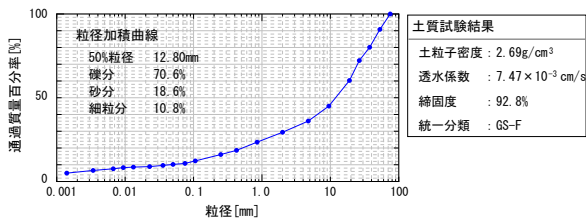


図-5 盛土材の粒度分布・土質試験結果

流水による堤防表法面の侵食等が見られなかったことから、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。

(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-7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。

また図-8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では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では縦断測線上の堤防部分が概ね全崩壊しこれ以

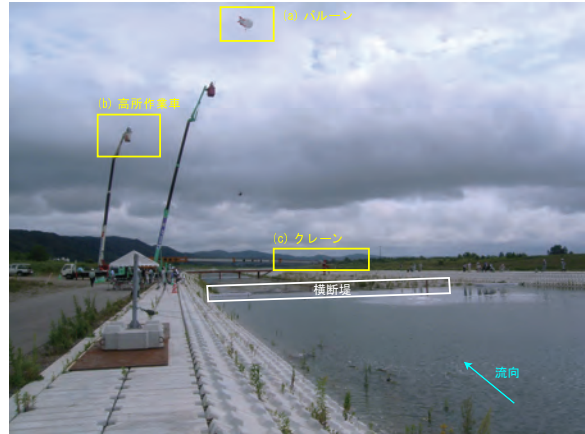


図-6 ビデオカメラを用いた実験状況撮影

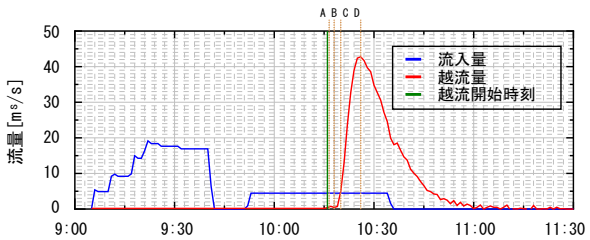


図-7 越流入量・破堤の進行状況

降、横断測線方向へ破堤が拡幅していく。時刻Dでは越流量ピークをむかえている。

b) 破堤の進行状況(縦断測線方向)

図-9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。越水開始時間以降はセンサーの設置高とその地点の破堤時刻をプロットしている。図-9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前後で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-9右はセンサー記録を用いた横断測線上の破



図-8 実験状況 (10:16:30~10:34:00)

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

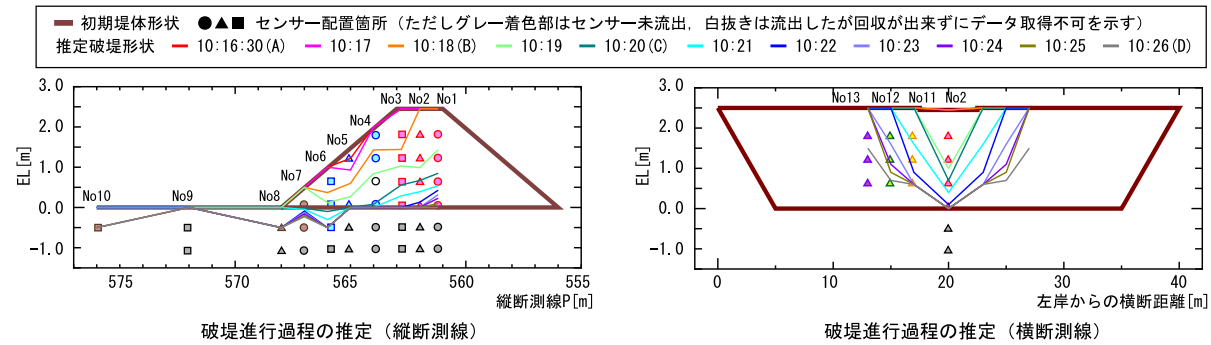
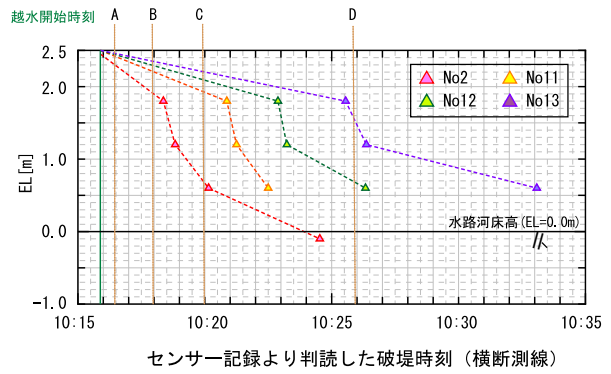
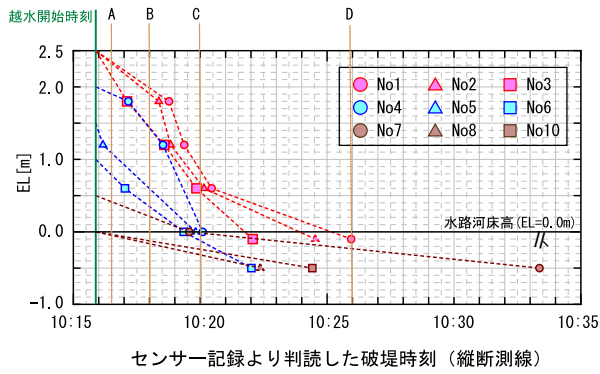


図-9 加速度センサーの記録を用いた破堤進行過程の推定 (左: 縦断測線上・右: 横断測線上)

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kkkkk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-10は実験終了後の形状を三次元レーザーキャナ、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⁷⁾と一致している。落ち掘れの形状は延長L約28m、最大洗掘深D約0.8m、また堤防の天端開口幅B約18mであり、図-11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⁷⁾)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たことがわかる。

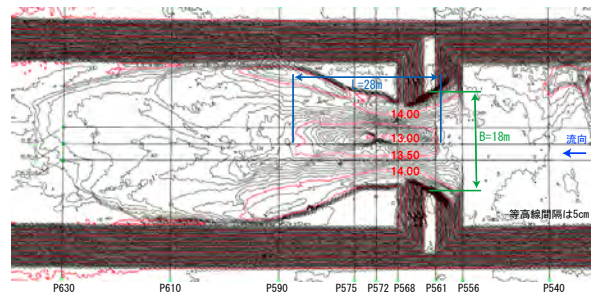


図-10 実験終了後の堤防・落ち掘れ形状

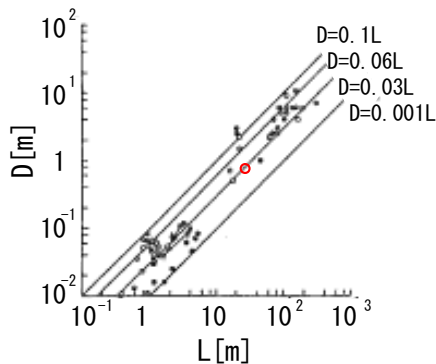
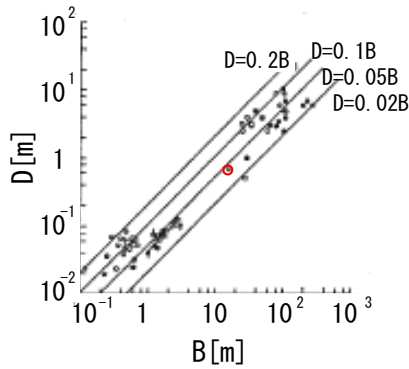
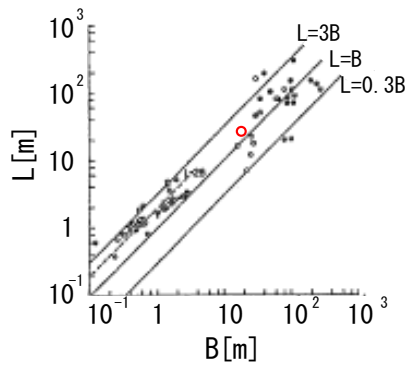
4. 破堤の拡幅過程

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⁷⁾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-12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(ビデオ画像から1分毎の値を判読)。

開口幅変化率が最も大きいのは越流量ピークの間D以前に発生している。藤田ら⁷⁾は破堤の拡がり過程は掃流作用ではなく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-9に示したように、縦断測



既往の実験及び現地資料

$L = (2 \sim 3) B$; 室内実験

$L=B$ を中心に 1 order ; 現地資料

$D = (0.05 \sim 0.1) B$

$D = (0.03 \sim 0.06) L$

今回の実験結果 (○)

$L = 1.6 B$

$D = 0.05 B$

$D = 0.03 L$

図-11 落ち掘れの形状特性⁷⁾

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-9 の No.13 で堤体下方が崩壊した時刻 (10:33) から 3 分後には 0.4m/min の開口幅変化率が現れており、既往の推測の域から実

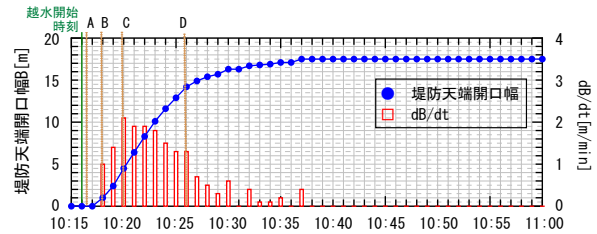


図-12 破堤拡幅過程

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 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、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、他の研究について適用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であったが、実スケールでその現象を捉えることが出来た。

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) 島田友典ほか：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，Vol.53，2009。(投稿中)
- 3) T. Shimada et al. : Basic hydraulic characteristic of the Chiyoda experimental channel, River Flow 2008, Vol.3, pp.1805-1813, 2008.
- 4) 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.
- 5) 島田友典ほか：十勝川千代田実験水路における横断堤を用いた正面越流破堤実験，寒地土木研究所月報，第 669 号，2009。(投稿中)
- 6) 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。
- 7) 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。