

越流の誘因が破堤過程に及ぼす影響の 実験的検討

EXPERIMENTAL STUDY ON INFLUENCE OF BREACHING PROCESSES OF FLOOD LEVEE FOR TRIGGER OF OVER FLOW

溝口 敦子
Atsuko MIZOGUCHI

¹正会員 博(工) 名城大学准教授 理工学部社会基盤デザイン工学科
(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

In these days, heavy rain fall and subsequent floods frequently happens. Therefore, we need the countermeasures against water disaster, and many researchers focus on flood levee. Some researchers focus on the breaching process of flood levee by over flow, particularly the process of enlargement of breach in order to making hazard map. And they proposed the method to calculate the breaching process with flow and sediment transport in river, floodplain and levee area simultaneously. However, they don't discuss the trigger of overflow, the trigger make the influence for the breaching process of flood levee. Therefore, in this paper, I treat breaching process of flood levee both with and without the transformation of levee by slope collapse. The series of experiments succeeded to explain the differences in breaching process by the trigger of overflow.

Key Words : Flood levee, over flow, breaching process of flood levee, flume experiment

1. はじめに

近年、豪雨災害等により毎年のように越流氾濫災害や堤防の決壊が報道されている。例えば、2011年9月の台風15号による庄内川志段味地区の越水による氾濫や2012年7月の九州北部豪雨災害での矢部川の堤防決壊は記憶に新しい。特に、矢部川の堤防決壊は、長期出水の後、水位のピークが過ぎてから起こっており、その要因は堤体基礎地盤がパイピング現象により流失しその上にあった堤体が崩落し変形したとされ、浸透現象が要因となった堤防の決壊として興味深く取り扱われている¹⁾。

こうした被災状況等を受け、最近では堤防を取り扱う研究が活発に行われており、主に地盤工学分野から堤体材料や表面探査、堤体内部の空気挙動等の研究^{例えば、2), 3), 4)}が実施されるとともに、水工学分野から堤防の決壊メカニズム等の研究^{例えば、5), 6)}が実施されている。堤防管理の上では、H. W. L.以下で堤防を機能させることが重要課題であり、堤防の変形を抑え、かつ堤防の機能を保持させるための堤体構造、強度に関する研究、水工学・地盤工学を融合させた堤体内の水、土砂、空気挙動に関する研究などが必要とされている。その一方で、実際にはH. W. L. に対応した堤防整備が進んでいない箇

所が多数存在しており、かつ、近年はH. W. L. 以上の出水の発生が多数報告されているため、堤防の決壊メカニズムを明確にし、越流に強い堤防を備える必要がある。あわせて、堤防決壊時の対応として氾濫解析の流入条件となる氾濫流量の予測から、破堤時の開口部に着目した検討も重要であり、既往の研究から堤体条件や河道条件を考慮した上で堤体と氾濫原を一体にした検討が必要であることが指摘されている^{例えば、6)}。

こうした状況をうけ、本研究では越流破堤に影響を及ぼす要素として越流の誘因に着目する。堤防からの越流が発生する要因は、超過洪水が発生しH. W. L.を上回ったり、整備が未完了で堤防高が不足していたりなどして実質的に堤防高を水位が超えてしまう場合と浸透現象により堤防の基礎地盤が崩れたり、法崩れが発生したり、外水によって堤体が洗掘されたりして、堤防自体が変形した結果として河川水位より堤防高が低くなる場合が考えられる。こうした越流の発生要因によって、破堤過程や周囲に与える影響が異なる可能性があり、かつ、それに応じて破堤災害を抑制する対策も異なってくる可能性がある。しかし、これまでの越流破堤過程の検討は、こうした越流の発生要因自体には触れられてこなかった。そこで本研究では越流破堤にいたる要因に着目し、小規模実験を用いて浸透による法崩れの発生について検討し

た上で、法崩れによる破堤と、堤防が局所的に低いことをイメージした切り欠きを用いた破堤についてその現象を定性的に検討していく。なお、本研究で用いた堤防は非常に小規模であるが、既往の研究^{例えば 6)}によりこうした小規模堤防を用いた実験でも定性的に破堤現象をとらえることは可能であることが示されている。

2. 予備実験：法崩れを誘発させる条件の検討

(1) 予備実験条件

実験では、長さ約19m、幅60cmの水路を用いて水路中央に図-1のような横断堤防区間を作り上流側に水をためて越流を誘発させ、破堤させる。本実験で越流の誘因として浸透現象を促し堤防を変形させることを考え、ここでは予備実験として浸透流によるパイピング現象、法崩れを誘発するための条件を検討することとした。なお、堤体およびその下の基礎地盤は、珪砂5号（平均粒径0.55mm）を用いて密度 $1.5 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ となるように毎回作成した。この条件で堤防の浸透破壊を誘発させるため、まず、下記の①～④項目を順番に検討した。

検討①：上流から給水する流量を2.6, 1.16, 0.83, $0.5 \text{m}^3/\text{s}$ と変化させ、湛水時の水位上昇に要する時間を変化させ、水位上昇と浸透現象について検討した。なお、 $0.83 \text{m}^3/\text{s}$ 時の水位上昇量は、 $0.011 \text{m}/\text{min}$ となる。

検討②：流量 $0.83 \text{m}^3/\text{s}$ で湛水し、その後、水を湛水させたまま一日放置する。

検討③：流量 $0.83 \text{m}^3/\text{s}$ で水を湛水し、湛水させた状態で堤防法面に直径5mm程度の穴を深さ3cm程度であけ、数時間放置する。

検討④：基礎地盤の一部に堤体材料より粗い砂を入れ、その設置条件を変えることでそれをきっかけとした法崩れの発生について検討する。なお、湛水は流量 $0.83 \text{m}^3/\text{s}$ で行い、堤体高より1cm下に水位が来た時点で止水した。

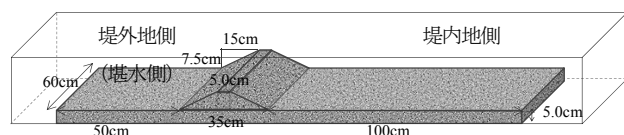


図-1 実験における堤体周辺の設定

なお、実験では、堤内地に相当する水路下流側において基礎地盤まで水を入れ飽和させた上で実施した。実験時には、堤体側壁ガラスから堤体の横断面および堤体斜め上部からのビデオ撮影で堤防の変形過程、進行速度を把握し、かつ、レーザ変位計を水路横断方向に動かすこ

とで堤防天端中央およびその周辺の堤防形状（基礎地盤形状）を把握し、破堤口の拡大過程を検討する。また、堤外地となる水路上流部の湛水域には、超音波水位計を設置することで水位の計測を行った。

(2) 小規模堤防が浸透破壊に至る条件の検討

結果として、今回の実験で用いた堤防形状および締め固めの条件において、検討①～③では、わずかな法崩れの発生が確認されることはあっても、堤防全体の変形につながらず越流は発生せず破堤にいたることはなかった。検討③では、パイピングのような現象の発生を期待して実施したが、実験を長時間継続しても壊れる様子がなく、さらに深く穴をあけることを試みたが、堤体材料が少し流れ出ても堤体材料に粘着性がないため穴の周囲が崩れてすぐに現象は止まる結果となった。つまり、本実験条件では堤体の穴だけで浸透流が誘発されることはなく、堤防にあけた穴をきっかけとして破堤に至ることはなかった。

そこで、検討④として法面崩れを再現させるために基礎地盤の一部の材料を変化させ、平均粒径2.0mm程度の三河珪砂3号に置き換えることで基礎部分の透水性を良くして上流側の水圧の伝播させやすくすることを考えた。ここでは、図-2および表-1に示す条件を設定した。なお、検討④の実験では、湛水後しばらくすると基礎地盤付近から染み出す程度の漏水が起こっていることが確認され、実験継続時間が長いものは水位が低下していった。そのため、水位低下した場合には必要に応じて湛水領域の水面が波立たないようにゆっくりと水を追加した。

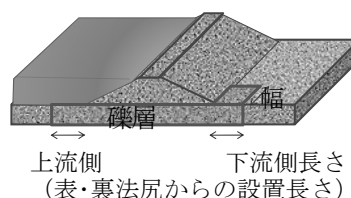


図-2 基礎地盤における3号砂設置条件説明図

表-1 基礎地盤の3号砂の設置条件 (単位: cm)

	幅	上流側長さ	下流側長さ
Case0	5	10	10
Case1	5	10	0
Case2	10	10	0

(3) 法崩れの誘発条件

検討④では、(1)で示したように堤体の基礎地盤の粒度を図-2および表-1で説明する位置で変化させた堤防区間を作成し、法崩れの誘発を試みる。結果として、Case0においては、5時間以上放置しても漏水により湛水

区間の水位が減少するのみで法崩れは発生しないことが確認された。次に、Case1, 2を実施したところ、法尻から法崩れが起こり破堤に至るまでそれが進行していった。

まず、この実験で堤体の基本材料として用いた平均粒径0.55mmと基礎地盤に設置した2.0mmの砂では、クレーガー法⁸⁾に従うと実質的に透水係数が $1.8 \times 10^{-2} \text{m/s}$ と $8.6 \times 10^{-4} \text{m/s}$ と推定され、大きく異なっている。つまり、基礎地盤の3号砂部分は、容易に水が浸み込み、堤内地側への安定した水みちとなりうる。その結果、湛水域と堤内地側の基盤高さとの水位差分の圧力が堤体下の水みちへ伝播するがそのまま下流側へ抜けるため、上部の堤体にはそれほど影響を与えない結果となった。一方、Case1, 2においては、透水性の高い材料を配置しているにも関わらずそこにかかる圧力が堤内地側には抜けていない。その結果、湛水域との水位差分の圧力が先に堤体下の基盤部分にかかることになり、堤体は下部から水圧がかかることで水が浸透、上部の地盤厚さが薄い法尻部分からすべり、法崩れが生じたと考えられる。この裏付けとして、この実験で発生する法崩れは必ず基礎地盤の透水性の高い材料を設置した幅で発生することが確認されている。

法崩れや円弧すべりの発生は通常浸潤面が法面に達することで起こるとされているが、浸潤面は河川側から進むとは限らず今回の実験条件のように基礎地盤に透水性の良い材料が存在し、かつ、それが堤内地側へ抜けていない場合に基礎地盤を通じて堤体へ影響し浸潤面が上昇する可能性も示された。ただし、堤体および礫層の透水係数がどの程度であればこうした現象が現地で発生するかなど現地を意識した検討は、今後の課題となる。

(4) 法崩れから越流にいたるまでの現象について

今回の実験のCase1, 2における堤防の法崩れは、基本的に図-3の過程で法尻から天端に向かって徐々に進む。崩れが進む幅はCase1と2では異なり、基礎地盤に設置した透水性の高い材料の幅によって変化する結果となった(図-4)。

対象とした現象の進行速度については、図-5に極端な例をあげ湛水域における水位時間変化を示すように、越流による水位低下が異なり、基本的に法崩れが起こりだしてから越流にいたるまでに要する時間は複数回の実験で変動した。今回の実験で法崩れ発生時間や現象の進行過程は変化しないことが確認されたものの、浸透による法崩れが起こり始めてから越流に要する時間は変動しやすかった。つまり、法崩れの進行速度は、透水性の高い材料の設置幅よりも堤体の初期形状の微妙な違いや締め固めの不均一性の影響が出やすい可能性が高く、今回系統的な結論を得ることができなかった。これについては実験の精度向上に向けた堤体設置方法の修正も視野に入れ、今後さらなる検討を進めることを予定している。

また、堤体材料が粘着性を持たないため円弧すべりではなく、だらだらと水とともに高濃度で砂が流れる土砂流的なものが発生し法尻から崩れた。こうした現象が発生するような砂質堤防は多くはないと考えられるが、この後、浸透流を起因とした堤防天端幅を含めた堤体の変形の一例としてはそれなりに意味をもつと考え、3章では、こうした変形が越流破堤現象に及ぼす影響について考える。

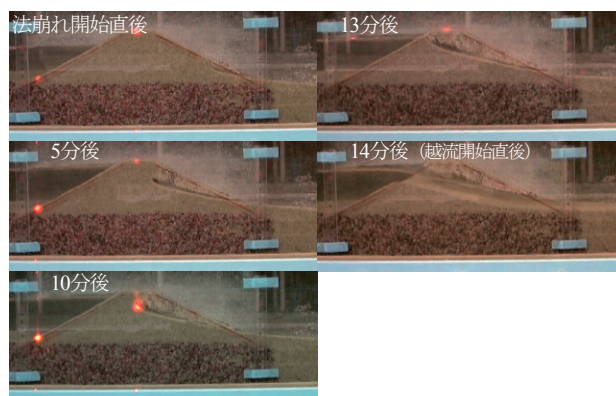


図-3 法崩れの進行状況 (Case2)

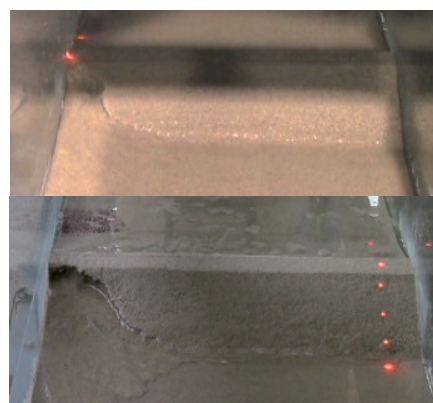


図-4 法面崩れの様子(上: 基盤設置幅5cm, 下: 10cm)

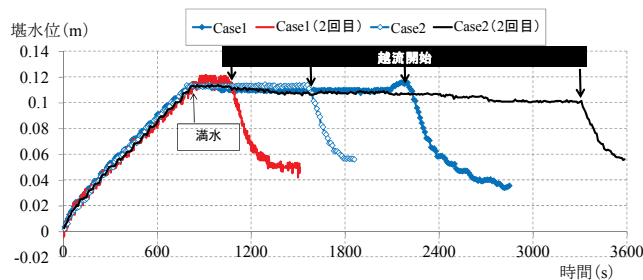


図-5 湛水位の時間変化

3. 越流の誘因による破堤過程の違い

(1) 実験の目的と実験条件

上述したように、既往の研究によると、破堤過程は河道条件や堤内地側の条件等によって変化する現象である

とされ、氾濫解析や減災に向けて堤内地と河道の条件も視野に入れた検討により定性的な特徴が議論されてきた（例えば、6）、7）。また、越流にいたる誘因は必ずしも堤防高を河川水位が超す現象だけでなく、浸透現象による堤防の変形も考えられるため、初期越流破堤口を決める変形が越流の誘因による破堤過程、つまり破堤口拡大過程にどのような違いが現れるのかを検討しておく必要がある。

そこで、ここでは、2章と同様に水路に堤防区間を設けて、越流誘因の破堤過程へ及ぼす現象に着目し、堰水前から堤防に切り欠きを設置して越流させるケースと、法崩れを誘発させ越流にいたるケースを実施する（図-6）。加えて、切り欠きの幅を極端に変化させ、初期越流幅が異なる場合の現象の進行についても検討した。なお、堤体の法崩れを誘発させ越流を促すケースについては、2章に示した予備実験の結果を受け、基礎地盤に透水係数が異なる材料を幅5cm、10cm（前章のCase1、2に相当）で配置し行った。また、切り欠きを設けるケースには図-6にあるように通水開始時には開口部に水のうやアクリル板などを置き、越流を開始させる水位をそろえるため、できるだけ基準の水位に達した時に切り欠きを開口させる方法で実施した。

なお、本実験は破堤現象が河道側の条件の影響を受ける⁷⁾ことを避け、水路横断堤防を用いた。しかし、横断堤防を用いる実験では、破堤に伴う堤内地側への水の流出に伴い堰水域の水位は減少し、最終的にはすべての水が開口部から流出する。つまり、越流開始後は流出量に応じて外水位にあたる堰水域の水位は徐々に低下する。できるだけ堰水領域長は長くとり即座に水がなくならないように設定したが、初期段階で流出流量が極端に多ければその分堰水領域の水位は下がるため外水側の水位条件がケースによっては他のケースと極端に異なってしまうことを明記しておく。

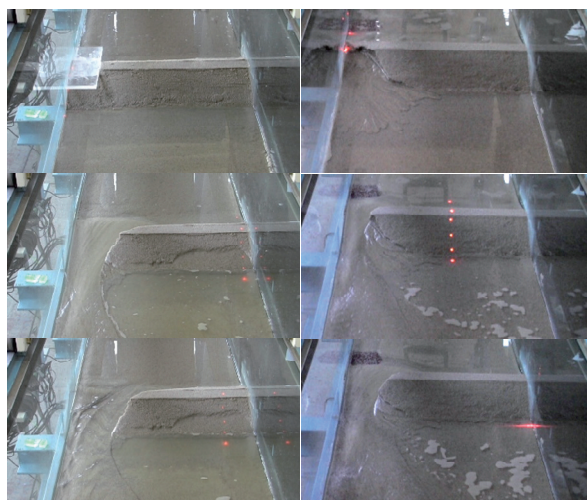


図-6 破堤口拡大過程
(左図：切り欠き、右図：透水性の高い礫層を設置)

(2) 越流の要因による破堤過程の違い

ここでは、越流に至る2つの要因について破堤過程の違いについて検討する。2章の実験結果からもわかるように法崩れが起こって越流にいたる場合、越流にいたるまでに堤体が崩れるため破堤部の堤体幅は薄くなっている。これは、越流開始時の破堤口に大きく関わり、破堤口の拡大過程に影響を与える。

例えば、切り欠き幅10cmとした場合に、天端中央部の破堤口の断面は、図-7のように広がっていく。なお、このときの越流開始時間は、14min12sであった。これに対し、法崩れをきっかけとしたケースは、図-8に示すように越流が開始する26minまでに大きく変形しているのがわかる。ここで、破堤口の拡大過程を水路側壁での堤防断面の変化、および、開口幅と最深点高さに代表させ時系列で示すと、図-9～11のようになり、法崩れ開始時点の変化が特に最深点に現れ、その後の時間変化に影響することがわかる。また、図-6に開口部の写真を示す。これらの結果から、本実験では、法崩れの場合には最深点の低下つまり堤体の下刻が先行し起こるため、開口幅については初期段階からそれほど大きく変化しない傾向にあり、切り欠きを設けた越流破堤のほうが下刻に伴う河岸侵食により最終的な開口幅は広がることが分かった。

また、越流開始からの堰水域からの流出流量の変化を堰水域の水位に代替させ図-10、11にあわせて示すと、幅5cm、10cm両者ともに法崩れによる破堤の方が、急激な水位低下が確認される。つまり、法崩れにより局所的

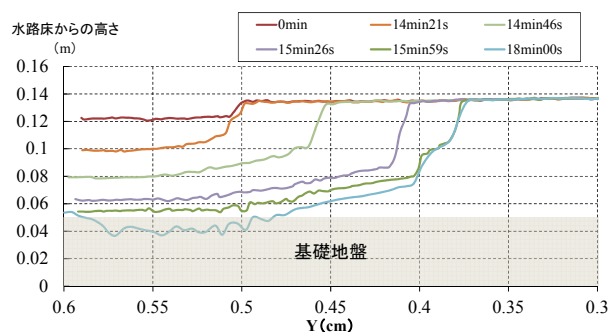


図-7 天端中央における拡幅状況（切り欠き幅10cm）

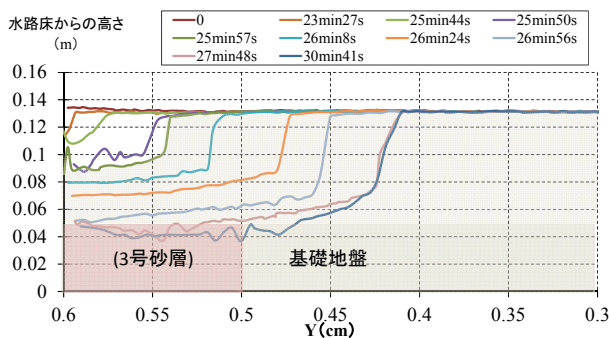


図-8 天端中央における拡幅状況
(幅10cmで透水性の高い礫層を設置)

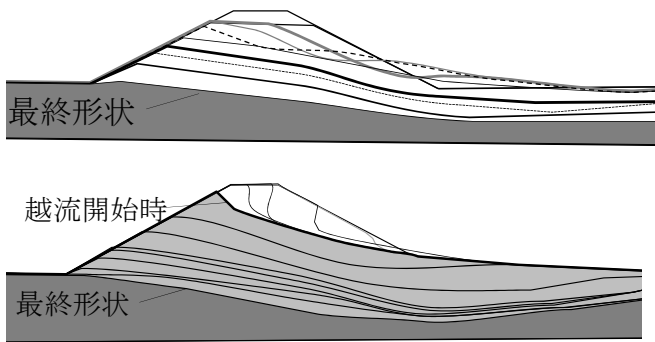


図-9 堤防断面の変化
(上図：切り欠き10cm, 下図：礫層幅10cm)

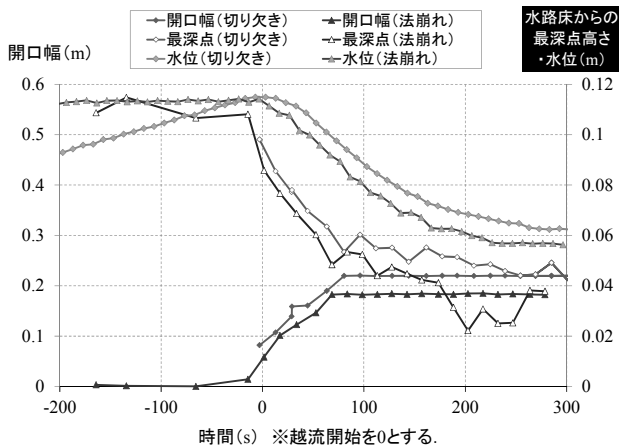


図-10 切り欠き，法崩れによる破堤過程の違い（幅10cm）
天端中央部の破堤口開口幅および最深点深さ，
堰水域水位の時間変化

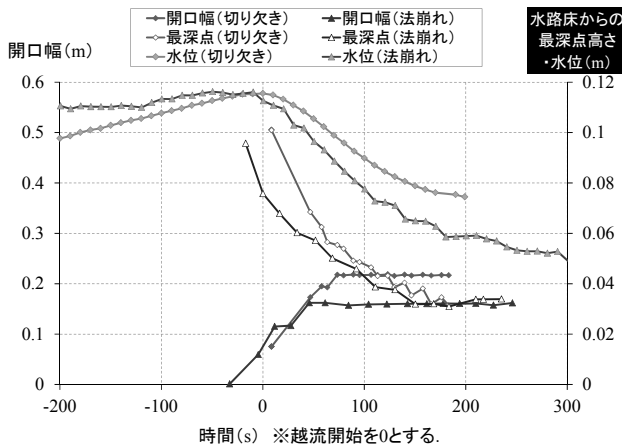


図-11 切り欠き，法崩れによる破堤過程の違い（幅5cm）
天端中央部の破堤口開口幅および最深点深さ，
堰水域水位の時間変化

に堤体が変形した場合には，越流開始時に限定された幅でかつ深い破堤幅が確保されているため，そこから多量の水が流出し，堰水位を下げる結果になったといえる。またこうした特徴から，堤内地側にできる落ち堀は，洗掘される場所は限定されたが切り欠きを設けた時よりも深くなることが確認された（図-9）。

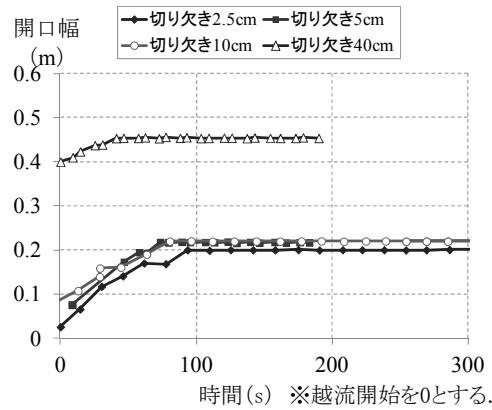


図-12 切り欠き幅による違い破堤口の拡幅時間変化

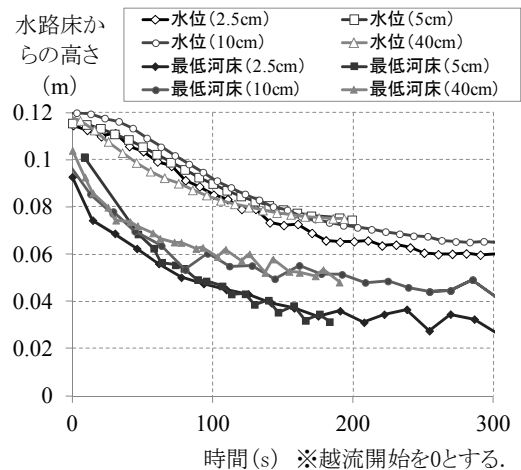


図-13 切り欠き幅による破堤過程の違い
天端中央部の最深点深さと堰水域水位の時間変化

(3) 切り欠き幅が越流破堤に及ぼす影響

前節で示したように，法崩れによる越流破堤は，越流初期の破堤口深さが切り欠きを設けた場合より大きくなり，越流初期に大量の水を排出する結果となった。

ここでは，実河川において堤防天端高の違い等で越流発生幅が変化することを意識し，破堤口の深さでなく越流幅が及ぼす影響について論じるため，切り欠き幅を2.5cmから40cmに変化させた場合についても破堤口拡大状況を調べる。

その結果，図-12，13のような天端中央部の破堤部開口幅および洗掘深さ，堰水域の水位の時間変化が見られた。これらの時間変化より，越流幅が小さい方が破堤口の下方浸食（下刻）が進む際に流量が集中し，横方向に浸食が進むこと，つまり開口幅が広がることがわかる。また，切り欠き幅が40cm以外のケースは開口部の拡幅が進むが，40cmのケースは最終的にはそれほど拡幅が進まないことが分かった。ただし，初期の下刻の進行速度，および横方向の拡幅速度は他の切り欠き幅と同様であるため，途中からの進行状況の変化は，流出流量が大きく堰水領域の水位が下がってしまったためと考えられる。つまり，こうした初期越流幅からその後の開口幅の

変化は河川側の水位条件によって決まるものの、基本的な下刻にともなう拡幅については越流水深で決まるため、越流幅によらず一定の値になると言える。

4. おわりに

本研究では、小規模堤防を用いた実験によって、越流破堤に至る要因に着目し検討した結果、以下のことが言える。

- ・堤体の基礎地盤に礫層が存在するとその部分は局所的に透水性が増し、堤内地側に漏水する原因となる。ただし、礫層が堤体を貫通しており堤内地側の表面まで至っていれば、ドレーンのような機能を果たし、堤防を破壊するに至らない。逆にその礫層が堤内地側に至っていなければ、堤体内の浸透現象に影響を与え法面の崩れが起こりやすくなる。
- ・堤体の基礎地盤に礫層が存在し、法面崩れを起こしていく場合、越流発生に至るまで基礎地盤の存在幅を最大幅として堤防の変形が進む。特に最終的に越流時には堤防の厚みが無くなっているため、越流発生時には簡単に破堤に至る。
- ・越流発生後の破堤過程は、初期段階で越流破堤の要因によって異なる。特に、浸透流により堤防が変形し越流に至った場合には、初期段階で堤防開口面積が大きいため堤内地側への流出流量が大きく、かつ、越流開始直後にかかる掃流力が局所的に大きくなるため落ち堀が大きい結果となった。
- ・越流破堤時の初期越流幅が大きければ、流出流量を大きくするが、初期の下刻等にはあまり変化がなかった。逆に初期越流幅が小さければ、流量が集中し洗掘が多くなる傾向にあった。

本研究では、小規模実験での定性的な検討にとどまっている。しかし、破堤のメカニズムに関して、既往の研究結果^{6)・7)}から、大規模な実験や詳細な流れを解く数値解析でなくても小規模実験や平面二次元での数値解析である程度は定性的検討ができることが分かってきたことを踏まえると、定性的な現象はとらえられたと考えられる。ただし、メカニズム的にも実現象を踏まえたうえで十分検討する余地はあり、今後、現地においてどの程度の透水性の違いで今回のような法崩れが誘発されるのか、越流のきっかけ、つまり破堤直前の堤防形状が破堤現象の進行にどの程度の時間的スケールで変化を及ぼすのかを検討していく必要があると考えている。さらに現地を意識して、堤防の被覆条件によりこうした破堤のメカニズムがどう変化するか、どのような堤体条件、河道

条件がメカニズムを変えうるかについて検討していく予定である。

さらに、既往の破堤災害事例については、明確に要因を追究できるとは限らず、大抵の場合、原因は推測にとどまっている。水位上昇により越流したものの破堤にいたらなかった事例^{例えば、9)}、浸透による堤防の変形が起こっても越流に至らなかった事例^{例えば、10)}など多数存在することから、破堤のきっかけごとに堤防にどのような機能を付加すれば、決壊までの時間を延ばせるか等も追究する予定である。

謝辞

本研究の一部は、平成24年度私立大学戦略的研究基盤形成支援事業「21世紀型自然災害のリスク軽減に関するプロジェクト」（代表：名城大小高猛司教授）の一環として行われたものである。ここに、謝意を表する。

参考文献

- 1) 特集 土に潜む落とし穴「健全な堤体の下に潜む水の道」、日経コンストラクション、pp.33-35, 2011.11.
- 2) 小高 猛司、板橋 一雄、中島 康介、牧田 祐輝、李 圭太、上村 俊英、坪田 邦治、加藤 雅也、河川堤防砂礫の変形・強度特性の評価手法に関する考察地盤工学ジャーナル、Vol. 5, No. 2, 193-205, 2010.
- 3) 杉井俊夫、前田健一、斎藤秀樹、小林剛、尾畑功：EPS盛土を使った堤体横断面の表面波探査、河川技術論文集、第18巻、pp. 315-321, 2012.
- 4) 小林剛、前田健一、柴田賢：不飽和堤防の急速浸潤化に伴う間隙空気挙動と比抵抗モニタリングによる可視化、河川技術論文集、第18巻、pp. 293-298, 2012.
- 5) 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.
- 6) 辻本哲郎、田代喬、Md.Serazul ISLAM、吉池朋洋：小規模実験による破堤に及ぼす河床高の影響検討 - 天井川区間の破堤災害のリスク -、河川技術論文集、第18巻、pp. 381-386, 2012.
- 7) 辻本哲郎・鷺見哲也・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.
- 8) Creager, W. P., Justin, J. D., and Hinds, J.: Engineering for Dams, Vol.III, Earth, Rock-fill, Steel and Timber dams, John Wiley & Sons, Inc., N.Y., pp.645~649, 1945.
- 9) 国土交通省中部地方整備局河川部：台風15 号による庄内川の出水状況（速報版）、平成23年9月23日版
- 10) 愛知県河川整備計画流域委員会：第40回愛知県河川整備計画流域委員会資料「庄内川上流圏域」、平成24年2月2日

(2013. 4. 4 受付)