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-

EFFECT OF RIVER BED HEIGHT FROM FLOODPLAIN LEVEL ON LEVEE BREACHING PROCESS THROUGH SMAL-SCALE LABORATORY EXPERIMENTS -RISK OF DISASTER BY LEVEE BREACH IN "TENJO-GAWA" SEGMENT-

辻本哲郎¹・田代 喬²・Md. Serazul ISLAM³・吉池朋洋⁴ Tetsuro TSUJIMOTO, Takashi TASHIRO, Md. Serazul ISLAM and Tomohiro YOSHIIKE

1フェロー会員 工博 名古屋大学大学院工学研究科教授 社会基盤工学専攻(〒464-8603 名古屋市千種区不老町) 2正会員 博士(工) 名古屋大学大学院環境学研究科准教授 都市環境学専攻 3学生会員 M. Eng. 名古屋大学大学院工学研究科博士後期課程 社会基盤工学専攻 4学生会員 名古屋大学大学院工学研究科博士前期課程 社会基盤工学専攻

Small-scale laboratory experiments were conducted by using sand for understanding the phenomena appearing not only at a levee but also in floodplain and along river bed. The authors are concurrently carrying out the numerical study along the same scenario, and these two approaches may provide us more information to understand the levee breach and successive disaster. In this study, a particular reference is put on levee breach and phenomena appearing on a floodplain in case of a river with higher bed level compared to the floodplain level. The higher bed level brings more rapid propagation of levee breach and widening and more sediment deposition in flooded area. And, sometimes river bed degradation in the upstream of the levee breaching point may cause further risk of levee breach in the upstream reach of the river.

Key Words : Flood disaster, levee breach, laboratory experiment, river with higher bed elevation, inundation with sediment deposition

1. まえがき

近年頻発する豪雨は、治水整備未進捗の状況での越流破堤のリスクを高めている。中小河川には天井川解消が進んでいないところがあり、こうした区間では越流破堤が起きやすいとともに、破堤時には築堤材料、河川流砂だけでなく河床材料の吐出分が堤内地に堆積し被害を増大させるほか、破堤口上流へ河床低下を伝播させて上流部堤体の安全性喪失、河道下流部との河床高差による破堤部への流量集中など、破堤拡大と被害増加の連鎖が懸念される。こうしたシナリオを認識するため、実験室規模で、破堤時の堤防、河道、氾濫原の地形変化を計測する基礎実験を実施、河床比高による破堤現象の相違を明らかにする。

2. 破堤過程に関する従来の研究

破堤の原因は、大きく(1)越流破堤、(2)洗掘破堤(表 法の側岸侵食及び護岸根入部の局所洗掘)と(3)浸透破堤 (裏法すべり、パイピングによる進行性破壊)に分けられ る. 治水計画上, 洪水位は計画高水位HWL(堤防天端高は それに余裕高を加えたもの)以下に抑えられるので、越 流破堤はむしろあってはならない状況での現象で、正面 切ってこの過程や機構を研究した例は少なかった. 一方 洗掘破堤や浸透破堤はHWL以下でも生起しうる一方それ は河川管理瑕疵につながることから、こうした事象の生 じる限界(たとえばすべりに対する安全率や限界動水勾 配など)を議論する研究例はあるが、破堤過程について はそのものがあってはなら無い状況ということもあって 研究例は極めて少ない. しかし、今日では整備水準を超 える洪水を想定した減災を考えるのが当然であり、こう した事態を織り込んでハザードマップの基となる浸水想 定区域図が作成される. しかし, 破堤過程や機構につい ての知見は乏しくわずかな経験にもとづいた「破堤モデ ル|がハザードマップ作成マニュアルに記載されている

のみである.こうした視点から、とくに2000年東海豪雨 (新川破堤), 2004年豪雨(刈谷田川・五十嵐川破堤)を契 機に、著者らは数値解析によって破堤過程の特性を知る 研究を行ってきた1),2),3). これらの研究は、河道、堤防、 氾濫原が概ね同一の材料で構成されていること、いった ん越流してそれに伴う破堤が始まればこの3領域におい て移動床過程が出現するということに着目し、この3領 域を一体化して数値解析するものである. 破堤口周辺に 局所的な流れや洗掘が現れるものの、基本的な現象の枠 組みは3領域を一体的に平面2次元解析することで把握で きるものと考えて研究を進めたものである. これに先行 した藤田ら^{4,5)}の小規模実験は、実経験ではなかなか知 り得ない破堤進行過程中の現象把握に有意義なもので、 また数値解析結果の検証にも利用できた. 数値解析の導 入によって、様々な条件での破堤過程のほか、氾濫原の 条件による破堤・氾濫流, 氾濫原での洗掘・堆積現象も検 計できる6ようになったことが特筆される. 破場や氾濫流だけ でなく、破場口近傍の洗掘(落堀)の発達とその破場過程 への影響, 堤内地での土砂堆積(農地災害)⁷⁾などの議論 も重要な課題で、数値解析によるアプローチには精度向上 に課題が残る一方、相似率の確保に課題を持つとされる小 規模実験とともに捨てがたいアプローチといえる.

相似性を確保した大規模実験では場所・施設の制限から正面越流による実験(河川流の影響を無視)が土木研究所で実施された⁸が堤防の耐越水化が主目的であった. やっと最近になって千代田実験水路において洪水流による破堤機構解明を目的に大規模実験が行われる^{9,10}ようになりその成果が期待されている.

3. 研究対象と実験条件・方法

(1) 研究で対象とする天井川区間

本研究で天井川河道に着目したのは、堤内地が低くて破堤進行が助長されること、また破堤口からの吐き出し土砂量の大きいこと(築堤材料だけでなく河床材料も吐き出され、氾濫による堤内地土砂堆積が大きく農地被害が大)が予想され、こうした災害現象のリスクを把握するためである。今回の実験的研究では、揖斐川の右支川、牧田川の典型的な天井川区間(河床勾配約1/500の礫河川、図-1図-1参照)を参考に室内規模実験を企画した。

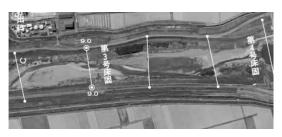


図-1 揖斐川水系支川牧田川の天井川区間

大垣市養老町の史料(1989)によれば、牧田川のような 天井川の破堤の性質として以下のような記載がある。一度破堤が発生すると築堤材料や河川流砂のみならず、通常の破堤ではあまり見られない破堤口よりも上流部の河床材料も流出し続け、その被害を増大させる。破堤に伴う河床材料流出によって河床低下の上流方向への伝播により上流部堤体の安全性を喪失させるほか、破堤口よりも下流との河床高に高低差が生じ、破堤部へ流れが集中することにより破堤拡大と被害増加の負の連鎖が生じる。洪水の終了後も河床が高いために氾濫した水がひきにくく、長期湛水による農地の荒廃、衛生環境の悪化による伝染病の発生等の二次災害も起こりうる。そのため天井川の破堤はとりわけ危険なものとされてきた。本研究ではこうした牧田川の天井川傾向が著しい区間を参考河道として、実験水路中にその約1/100模型を想定して再現した。

(2) 実験装置

実験水路(図-2)は、幅2.20m、長さ20mでその中に、水面幅0.3mの河道、1.2m幅の氾濫原、天端幅0.05m、氾濫原からの比高0.15m(法勾配2割)の堤防を1.0mmの砂で作成した。河道河床の氾濫原からの比高を3通りに変化させ、天井川河川の破堤現象の特徴を抽出できるようにした。なお堤防天端には天端から深さ0.05m、縦断方向に0.10m幅の切欠部を設け、越流破堤の初期条件とした。

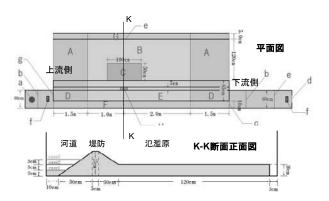


図-2 実験水路に再現された河道・堤防・氾濫原

本研究で用いた室内実験水路は循環型水路で地下貯水槽に貯えた水をポンプで循環させる仕組みになっている.河道模型としては牧田川実スケールの1/100を想定し、水面幅50cmの河道,1.2m幅の堤内地、天端幅5cm、氾濫原からの比高15cm(法勾配2割)の堤防を作成した.堤防や河床、堤内地に用いる砂は、同じ粒径1.0mm程度の砂(三河珪砂製V3号)を用いた.ただし、堤防の表法面側と河道水路の一部には、漏水による崩壊を軽減するためにシルト(三河珪砂製珪砂8号)を少量表面に吹き付けてコーティングした.また、河道は十分な長さを確保しつつ、破堤口周辺の地形変化に着目して計測するという目的に支障のない範囲において、実験装置の一部は防水防腐加工を施した木製固定床とした.なお、当該区間は実

験装置上流側1.5m,下流側1.5mの堤体及び堤内地,実験 装置の中間部3.0mの堤内地の一部である.上下流側1.5m 区間の堤内地には10cmの高さで防水加工を施した木製固 定床を設置した(図-2のA、D). 中間部3.0m区間の場内地 には5cmの底上げとその上から5cmの敷砂を行ったが、破 堤口付近のみ洗掘穴の形成を考慮し砂礫を敷き詰め、移 動床とした(図-2のB, C, E). 破堤口は上流端から2.5m の位置とし、天端にあらかじめ流下方向長さ10cm、高さ 5.0cmの切欠きを設け、水位を上昇させた後に切欠き部 から越流を生じさせる(図-2のH). なお, 実際の河川と 同様に堰上げ背水条件(牧田川は低平地を流れてきて洪 水時の水が高い揖斐川に合流)のもとでの越流破堤実験 も可能なように下流には堰上げ板を設置した(図-2のc). 基準断面(K-K断面)の氾濫原をz=0とし、河道河床高z。 を3通りに変えて実験を行った. Run1: z₆=-5cm, Run2: z_b =0cm, Run3: z_b =5cm(天井川のケース).

(3) 実験方法

今回の実験においては材料として砂を用いたので、河床と比較してとくに堤防についてはそれなりの「土工管理」が必要である。ここでは砂が対象なので堤体の砂の乾燥密度とその砂の最大乾燥密度の比で定義される「締固め度」を指標とした。堤体の締固めには図-3のような器具を試作して、堤防を落下錘による層別突固めで締固め度100%を目指して作成した。なお、実験を行う直前に天端に切欠を設ける際に持ち出した材料から含水比の測定によって堤体の乾燥密度を求めた。

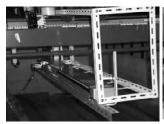


図-3 堤体の突き固めに用いた器具

ポンプから供給された水は整流水槽から四角堰を経て河道模型 (河床勾配1/500) に導かれる。四角堰の越流水深は波高計 (KENEK社製CHT6-30) で連続計測することにより河道模型への供給流量を求めた。下流端の水位調節堰の下流の整流槽でも三角堰を設け波高計 (KENEK社製CHT6-40) での越流水深を計測し,河道下流端からの流出量を求めた。河道区間への流入量 $Q_{\rm in}$ と流出量 $Q_{\rm verflow}$ を算定した。

実験中、破堤部の上に設置したビデオカメラ(JVC社製 GZ-HM350-B)によって破場口の拡大と越流の変化映像を

記録した. 破堤部の斜め上からもスチールカメラ(PENTAX 社製OptioS1)によって破堤口の拡大過程を撮影した. また, 正確な地形変化を計測するために, 実験水路上に備え付けられた台車2台に電動アクチュエーター(THK社製KMB-150A-A30)を1台ずつ横断方向(ストローク長1600mm)と縦断方向(ストローク長1000mm)に固定し(図-4,5参照),それらにレーザーセンサー(KEYENCE社製IL-600)を搭載した. 縦断方向にも動く台車上に設置しており, 縦断方向について幅広く計測可能である(図-5参照).



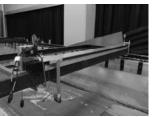


図-4 計測台車(アクチュエーター)



図-5 実験水路と測定装置

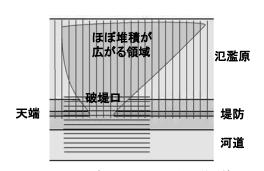


図-6 レーザーセンサーでの測地基準線

実験手順として、まずポンプから水を少しずつ供給し、水路全体を水で満たし、静水状態になり次第波高計の電圧ゼロセットを行った。所定の量を確保できるまで流量を増加させた後、堤体に設けた切欠き部分に水位が到達、越流する瞬間から実験・計測・ビデオ撮影を開始した。また、トレーサー(発泡スチロール粒子)を上流から散布し、ビデオ画像からLSPIV法によって流況(流速場)の概略を把握した。

天端・破堤口の変化については通水中毎分にレーザーセンサーで計測した。また10数分間で実験終了後、水が十分にひいからレーザーセンサーで河床および堤内地の地形計測を行った。測線は図-6に示したように、河床は

y=10cmの位置(y=0は実験水路の河道模型側の側壁)から3cm間隔で堤体の裏法面下端まで,堤内地は5cm間隔で流出土砂の堆積域全体を計測できるようにした(図-6参照).

実験条件は表-1にまとめた。今回のとりあげた実験ケースは3ケースとも同じ流量規模での比較を想定しており、河積の小さい天井川のケースではむしろ低下背水となっている(牧田川で起こりうる堰上げタイプではない)。

表-1 実験条件

	堤内地からの 河床の比高 (cm)	フルード数	河床勾配	粒径 (mm)	計測時間	供給流量	水面勾配	摩擦速度 (cm/s)
Run1	-5.0	0.12	1/500	1.0	1027"	8.95	0.0181	15.5
Run2	0.0	0.19	1/500	1.0	11'27"	8.71	0.0303	19.3
Run3	5.0	0.26	1/500	1.0	1010″	8.69	0.0753	22.6

4. 実験結果

(1) 実験による破堤進行過程

破堤の進行状況について、ビデオカメラで記録した映像からスナップ画像を抽出し、実験ケースごとに時系列でまとめ、破堤拡大過程の概要把握を行った。図-7はその一例でRun 1の結果であり、各スナップショットの左肩に通水(天端切欠部からの越流)開始後の経過時間(秒)を示している。このような破堤口の拡大過程の特徴は、藤田らの実験⁴や著者らの数値解析^{1),2)}でも指摘されたように、下刻(鉛直侵食)が先行、その後裏法開口部の水平方向拡大に移行して八の字型形状(上下流対称)が現れ、やがて下流方向への拡幅といった進行過程である。

図-8には破堤口拡大に伴う堤内地への氾濫流の増加を示した.この規模の実験では2~5分程度で河川への供給流量のほとんど堤内地への氾濫流となって,破堤拡大過程は終了する.今回は実験施設の制約上川幅が制限されたが,現象進行の時間的緩和(氾濫流量の制限)については川幅が影響することが考えられ,今後の検討課題である.なお氾濫流量の時間変化を詳細に見ると初期に流量の増加が鈍くある時期から急増する.この変化点が下刻中心の破堤から破堤口拡幅へのそれと一致している.

図-9は破堤口拡大過程(破堤口断面形状で堤防天端中心軸に沿った縦断形状)を、Run 2(河床高が氾濫原と同じ)とRun 3(天井川)で比較したもので(図の都合上時間軸がRun 2と3で異なっていることに注意)、天井川化している場合、下流側への破堤口の拡幅が極めて著しく、天井川で無い場合に比べ5割増にも達していることと、当初に破堤した部分では埋め戻しが生じていることが特徴である。また堤防天端中心軸上での最大深掘れ部は破堤口の下流端際にある。観測からも拡幅は、氾濫流に起因するというより斜め流が下流側に露出した堤防断面に直接当たっての侵食過程である。

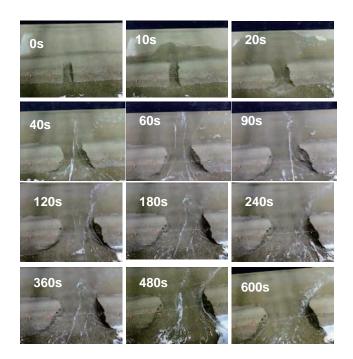


図-7 破堤口の拡大過程の例(Run 1)

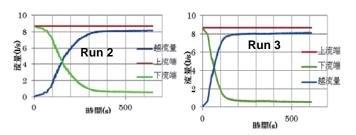


図-8 河川流量・氾濫流量の変化

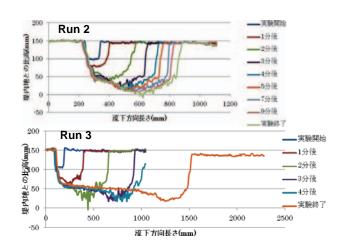


図-9 破堤口の発達過程

図-10には、破堤部の最終形状を初期河床高氾濫原面からの比高による相違として示した。河床高比高が小さいRun 1, Run 2では、破堤口が最終的に下流へ若干シフトしているものの比較的左右対称な形状をしているのに対し、天井川化の著しいRun 3では初期に形成される初期の破堤口はむしろ埋め戻され、下流へ進行的に破堤口の主

たる部分が伝播していく傾向であることが認められる.

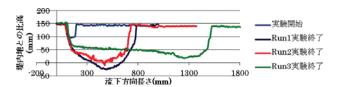


図-10 河床高の氾濫原からの比高による最終破堤形状の相違

(2) 氾濫原での現象

観測によれば、初期は河川流の影響を受けずに、堤内 地へ流れた土砂は堤防に直行するように破堤口中央付近 に堆積する. 越流した水流はその影響により上下流方向 両側に二分されるが、破堤口が拡大し、河川流の影響を受 けるにしたがって、堤内地での水流は下流方向へと歪曲し、 破堤口から上流側よりも下流側の洗掘が活発になり、また上 流側は少しずつ埋め戻されて堆積が生じる. これによって 上流側の堤内地に大きな土砂堆積が見られる. これらの傾 向は、藤田らりが実験によって、また鷲見らりが数値解析 によって指摘したこととも一致している.

こうした氾濫流と地形変化についての考察は、発泡スチロール製粒子をトレーサーにしたビデオ画像からのLSPIV法による流況(流速場)把握にもとづいている. 図-11はその結果の一例で、初期には正面越流的な流況が、破堤口の拡幅とともに河川流の影響を大きく受け、流速ベクトルはその方向に偏っていく. 河床比高が大きくない場合にはそれでも破堤口で河川横断方向に偏向させられるが、天井川化してくると破堤口の拡幅が著しく、破堤部での流れも河川流方向成分を強く持ち続け、下流側の堤防の突端にぶつかるように流れていて、これが破堤口拡幅の駆動力になっていることが推察される.

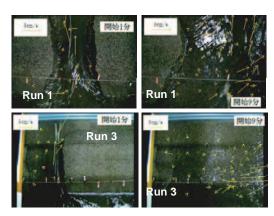


図-11 LSIVによる流況把握

図-12は実験終了後の氾濫原(河道, 堤体部分も含む) での地形変化状況を等高線表示したものである.

氾濫原での土砂堆積に着目すると、図-12からわかるように、Run 1では、破堤口下流側よりも破堤口上流側の堤内地に大きな土砂堆積が見られる。Run 2でも同様だが、

Run 1に比べて下流側への堆積が多い. 一方, Run 3では破堤口中央から堤内地に向かって土砂堆積が顕著である. これは, 破堤口の下流への侵食と上流側の埋め戻し作用が活発で, 越流が下流側へと移行するに従い堤内地での土砂堆積も下流側へ進んでいくためと推察される.

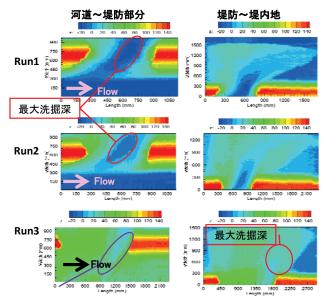


図-12 氾濫原の地形変化(実験終了後)

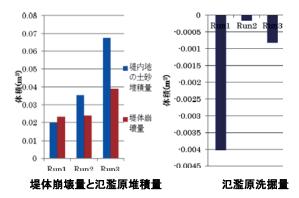


図-13 堤体崩壊量と氾濫原での堆積量・洗掘量(実験終了後)

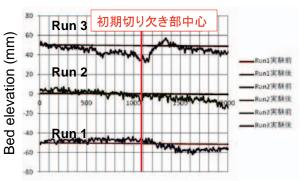
図-13には堤内地での土砂堆積量と堤体の崩壊量を棒グラフで示した。これからわかるように、河床の比高に応じて堤内地へ流出し堆積する土砂量や崩壊した堤体以外の材料流出が増加し、堆積する範囲も拡大する。

破堤部についても図-12からわかるように、いずれも河川流の方向に傾いた洗掘孔(落掘)が確認できた。また、藤田らりや千代田実験水路での実験の10と同様にRun 1、Run 2での落掘の形成は破堤部のほぼ中央で裏法尻近傍に出現している。しかしながら天井川を対象としたRun 3では、落掘の最大洗掘深は裏法尻近傍に存在しているもの破堤部中央に刻まれるのでなく下流に残る堤防寄りとなる。またRun 3の破堤部の形状は氾濫原に向かって広がるのでなくむしろ逆ハの字型を呈している、これらは河床高が堤内地よりも高いため河床材料が堤内地へ流れ込むことによって生じたと考

えられる. 図-13には堤内地での洗掘量も棒グラフで示した.

(3) 河道の状況

破堤現象に伴う河道の状況についても興味のあるところである。今回破堤進行中についての河床縦断形状の連続計測は出来なかったが、最終形状について得られた結果を図-14に示す。図に示すように、Run 1, Run 2では、氾濫による洪水流分派で流砂量分が氾濫流とともに氾濫原に出るためにおこる河道流砂の不連続によって下流が若干河床低下する傾向が認められるのに対し、天井川であるRun 3では氾濫流が破堤点での河床低下によって上流の河床土砂をも強制的に吐き出す傾向にあり、破堤点より上流に河床低下が伝播するのが特徴的である。このことは、天井川では破堤は下流に顕著に進行するとはいえ、上流側の堤防の安全性が堤脚部河床低下で脅かされることを危惧させる結果である。



Longitudinal dislatance along river (mm)

図-14 堤体崩壊量と氾濫原での堆積量・洗掘量(実験終了後)

6. あとがき

実験室規模での砂を用いた実験でも、堤防を落下錘による層別突固めで締固め度100%を目指して作成することによって越流による破堤過程を再現できた.これによって、さまざまな条件での河道・堤体・氾濫原の挙動の相違を確認する手段を持つことが出来た.今回の実験結果は図-15に示すようにRIC-Nays¹²⁾を用いた数値解析結果と良好に一致し、著者らが並行して進めている数値解析¹¹⁾の併用で、さまざまな条件での破堤を伴う河川災害形態のパターン分類などにも利用できる.また、今回の実験のように、装置や計測器の制約上から計測できていない諸量やその時空間分布について、こうした数値解析で補完することも可能である.

本論文でとくに意図した天井川区間の破堤については、破堤部が下流に大きく拡大すること、氾濫主体が下流へ移行することのほか、破堤口からの河床土砂の大量吐出が氾濫原の災害形態を助長させるとともに、破堤部より

上流の顕著な河床低下による破堤口への流量集中,上流側堤体の不安定化など,これまで認識が十分でなかった リスクの連鎖誘起が明らかになった.

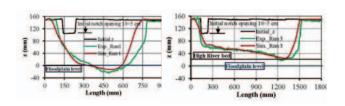


図-15 Ric-Naysを用いた数値解析結果との比較

なお,本研究は河川整備基金助成(調査・試験・研究)を受けて実施した(代表:辻本哲郎). またLSPIV法の適用に当たって椿涼太氏(広島大学)の協力を得た. 謝意を表する.

参考文献

- 1) 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,土木学会河川技術論文集, 第8巻,pp. 31-36,2002.
- 2) 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, 土木学会河川技術論文集, 第11巻, pp. 121-126, 2005.
- Tsujimoto, T., A. Mizoguchi and A. Maeda: Levee breach process in a river by overflow erosion. *River Flow 2006*, Proc. IAHR Sym. Fluvial Hydraulics, Lisbon, Taylor & Francis, pp.1547-1555, 2006.
- 4)藤田裕一郎,田村多佳志,村本嘉雄:河川堤防決壊ロの拡大 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. 369-391,1984.
- 5)藤田裕一郎、田村多佳志、村本嘉雄:河川堤防の決壊に伴う 外水と土砂の流入について、京都大学防災研究所年報第30号 B-2、pp. 527-549、1987.
- 6) 鷲見哲也, 岸本雅彦, 辻本哲郎: 越流による破堤進行に及ぼ す堤内地条件の影響, 土木学会河川技術論文集, 第10巻, pp. 215-220, 2004.
- Islam M.Z, K. Okubo, Y. Muramoto: Embankment failure and sedimentation over the flood plain in Bangladesh: Field investigation and basic model experiment. *Jour. Natural Disaster Science*, Vol.16, No.1, pp.27-53, 1994.
- 8) 建設省土木研究所:越水堤防調查最終報告書-解説編-,建設省土木究所資料,第2074号,1984.
- 9) 島田友典, 横山洋, 平井康幸, 辻珠希: 十勝川千代田実験水路における水路内縦断堤を用いた越水破堤実験, 寒地土木研究所月報第682号, pp. 15-31, 2010.
- 10) 北海道開発局・寒地土木研究所:河川堤防の越水越水破堤機構に関する研究報告書,2012.
- 11) Islam, M.S. and T. Tsujimoto: Numerical approach to levee breach as a key of flood disasters in low land. *Int. Jour. Civil Eng.*, Vol.4, No.1, Research Science Press, 2012.
- 12) Hokkaido Foundation for River Disaster Prevention Research Center: RIC-Nays, http://i-ric.org/nays/ja/sitemap.html

(2012. 4.5受付)