

千代田実験水路を用いた堤体材料の相違が 越水堤防決壊現象に与える影響に関する実験

THE LEVEE BREACH EXPERIMENT ON THE EFFECT OF LEVEE MATERIAL AT THE CHIYODA EXPERIMENTAL CHANNEL

島田友典¹・横山洋¹・前田俊一²・矢部浩規¹・桑村貴志³
Tomonori SHIMADA, Hiroshi YOKOYAMA, Shunichi MAEDA, Hiroki YABE
and Takashi KUWAMURA

¹正会員 工博 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)

²正会員 寒地土木研究所寒地水圏研究グループ (〒062-7602 北海道札幌市豊平区平岸1条3丁目)

³非会員 工博 北海道開発局帯広開発建設部治水課 (〒080-8585 北海道帯広市西5条南8丁目)

In August 2016, during the heavy rain in Hokkaido, overflowing in the Tokoro River section under the jurisdiction, seven embankments were confirmed but one site was destroyed. It is also important to clarify factors that did not lead to the collapse despite overflowing, in considering damage mitigation techniques. In order to analyze these factors, we conducted an experiment focusing on soil. The results of the experiments are as follows: It was shown that when the surface coverage was applied to the gravel embankment with clay, the time from the overshoot to the collapse was long, but in the widening process there was no difference from the gravel embankment.

Key Words: levee breach process, effect of levee material, Chiyoda experimental channel

1. はじめに

台風や局所的な集中豪雨などに起因した出水により大規模水害の発生リスクが高まってきており¹⁾, 河川堤防の整備が進んでいる今日でも破堤被害が発生している²⁾.

北海道においても2016年8月には半月ほどの間に3個の台風が上陸, 1個の台風が接近したことで北海道内各地において大雨となり, 9河川で堤防が決壊し, 79河川で氾濫が発生し甚大な被害が発生した³⁾. このうち常呂川直轄区間においても堤防からの越水が7箇所確認されているが, 破堤に至ったのは柴山沢川のみ1箇所であった. これについて常呂川堤防調査委員会では決壊したかどうかの要因の一つとして, 堤体材料の相違(砂質土か粘性土)があるとしている⁴⁾.

また令和元年台風第19号の被災を踏まえた技術検討会⁵⁾においても, 越水しても破堤に至らなかった箇所の調査から, 洪水外力だけでなく堤体材料の状態についても分析することが大事であると議論されている.

堤体材料の相違に着目した越水破堤に関する研究は, 関根ら⁶⁾や島田ら⁷⁾が粘性土を用いた破堤実験により検討を進めている. しかし, いずれも縮尺模型実験であるこ

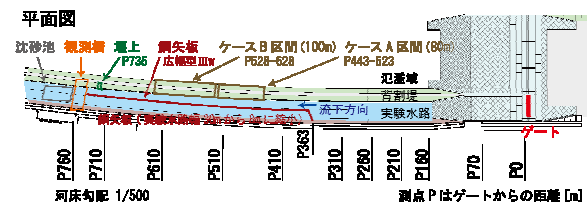


図-1 実験水路概要

とから粒径等の影響, 特に堤体土砂に粘土シルト分が含まれる条件では粒子間に電気化学的な力が作用することで砂礫に比べると現象は複雑で不明点が多いことから, 実物大規模である堤防を用いた検討が重要となる.

本論文では実物大規模である十勝川千代田実験水路⁸⁾を用いて, 堤体材料の相違が越水破堤現象に与える影響を示すとともに, 得られた知見より越水破堤時の被害軽減対策に関する考察を行った.

2. 実験概要

図-1に実験水路の概要を, 図-2に実験区間の平面拡大図, 実験ケースおよび観測概要, 図-3に堤体材料を示す.

実験区間拡大平面図（縦断距離：切欠部を0mとして、下流へ+、上流へ-と表記）

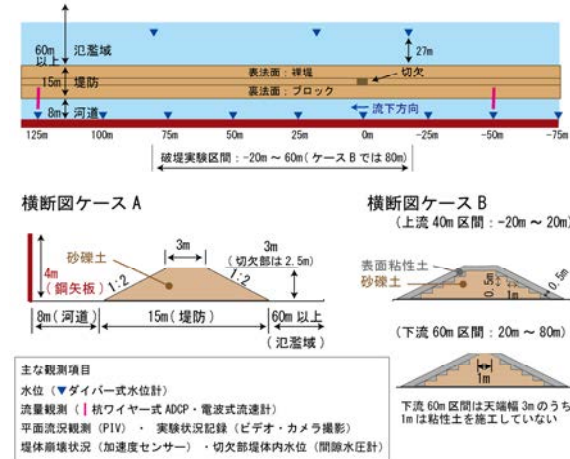
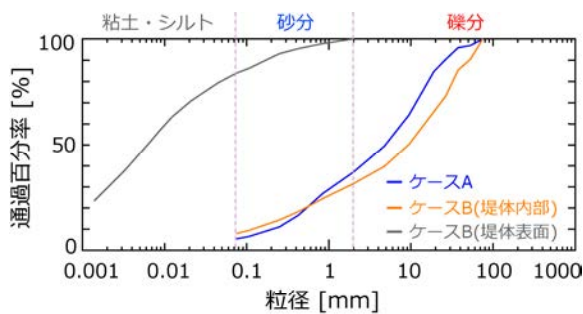


図-2 実験区間平面図・実験ケース横断面図・観測概要



粒度特性	ケースA	ケースB(内部)	ケースB(表面)
シルト・粘土 (5.4%)	31.7%	8.0%	16.1%
砂分	(31.7%)	23.6%	83.9%
礫分	(62.9%)	68.4%	
土粒子密度 [g/cm ³]	2.69	2.68	2.61
透水性係数 [m/s]	3.40E-02	3.81E-05	3.56E-06 ~ 7.46E-10
液性限界 [%]	-	26.8	68.1
塑性限界 [%]	-	18.9	33.5
塑性指数	-	7.9	33.5

図-3 堤体材料の土質試験結果

河道水路下幅は8m、堤防形状は高さ3m・天端幅3m・法勾配2割、越水のきっかけとして切欠（深さ0.5m・下幅1m・上幅3m）を設けた。通水はこの切欠部から越流水深が概ね30cm（既往被災事例等⁹⁾から判断して決定）となるように70m³/sを一定流量として通水、破堤実験区間の大半が破堤拡幅した時点で実験終了とした。

ケースA（既往実験のケース1¹⁰⁾・液性限界等は未実施）は現地材である砂礫土を用いた。ケースB¹¹⁾は堤体全てを粘性土とすると締固めが困難であったため、堤体表面0.5m及び段切部のみを粘性土とし堤体内部はケースA同様に砂礫土とした。施工年度は異なるもののケースA及びケースBの堤体内部の砂礫は成分が概ね一致している。また堤防基盤や河床は現地材の砂礫土である。

主な観測項目や観測位置は図-2に示すとおりであるが、使用した観測機器・観測手法については過去の実験で確立したものと同様である¹⁰⁾。

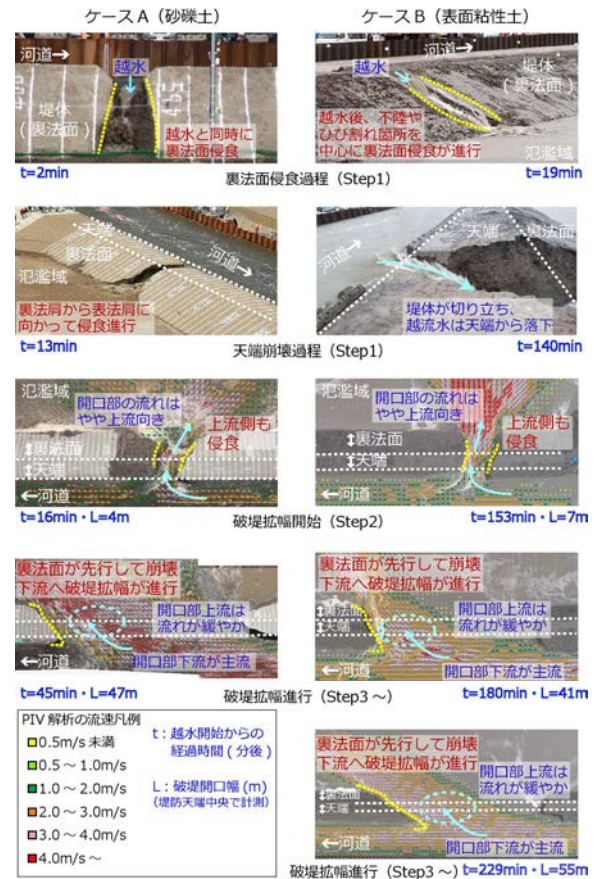


図-4 堤防決壊進行過程

3. 越水破堤進行過程の概要

越水から破堤拡幅終了までの概況について、図-4に上空から撮影した代表的な時刻の実験状況（PIV観測）を、図-5に観測結果より得られた各時系列変化（上段より、ゲートから実験水路への供給流量、切欠部における越流水深、ビデオより判読した堤防天端中央の破堤幅、破堤実験区間上下流部の河道流量および氾濫流量）を示す。両ケースともに越水開始から4つのStepを経て進行していることから、ここではStep毎の概況を示す。

[Step1] 越流水による裏法面の侵食過程の後、裏法肩から表法肩に向かって侵食される天端崩壊過程へと移行する。この時の越流水深（切欠部の河道水位一切欠天端高）は最大で30～40cm程度であった。このStepでは河道内の流れに大きな影響を与えることなく、河道から切欠部へ向かう流れがわずかに見られる程度であり、破堤拡幅を伴わない正面越流に近い現象⁹⁾である。なお侵食が越水開始から表法肩までに到達する時間はケースAでは15分程度、ケースBでは150分程度であり大きな差が生じているが、これは堤体材料の相違によることが一因と考えられ、詳細な進行過程については次項で考察を行う。

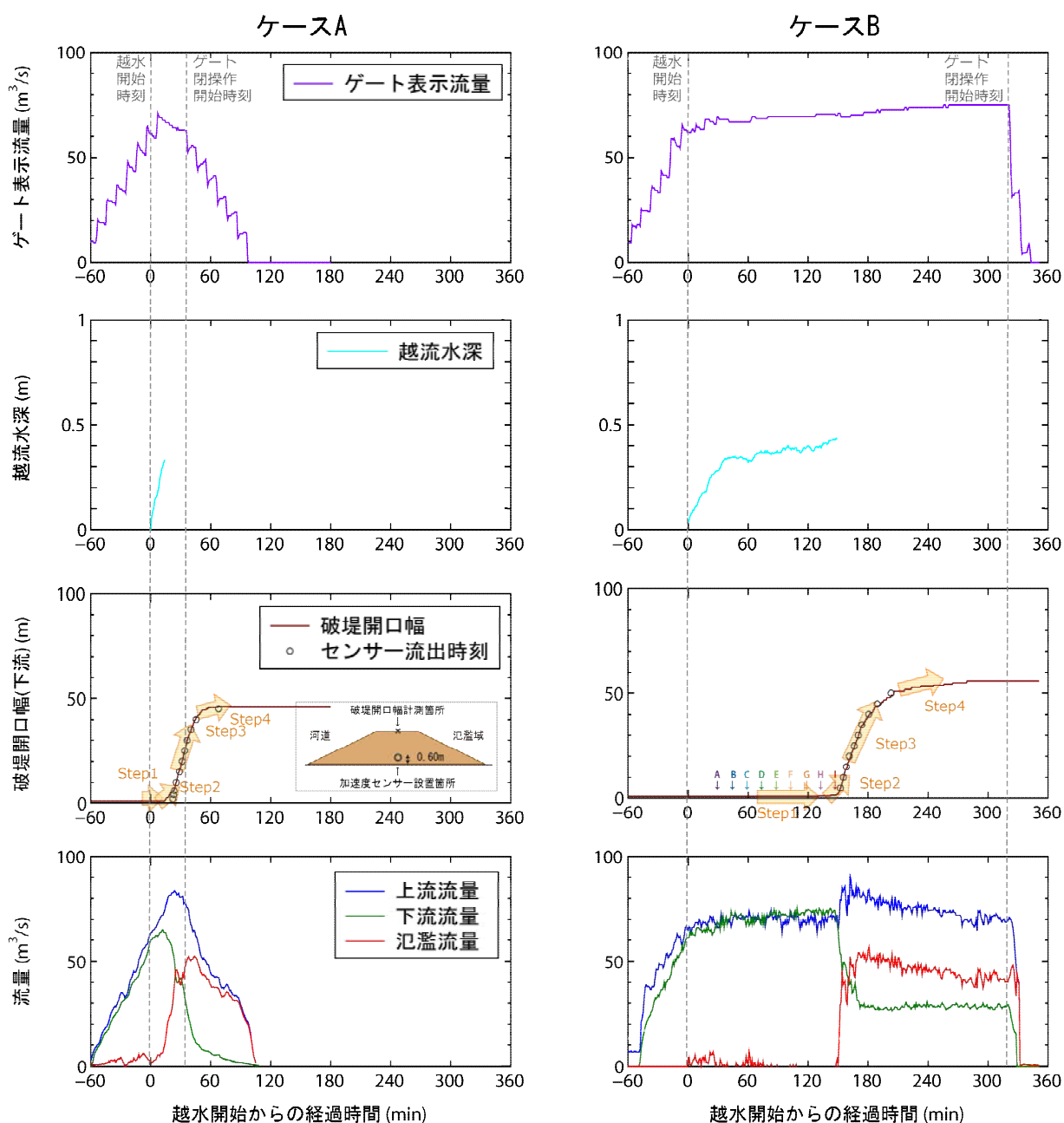


図-5 観測時系列変化（上段よりゲート供給流量、越流水深、破堤開口幅、河道内および氾濫流量）

[Step2] Step1において表法肩まで堤体の崩壊が進んだ後、流況は河道から切欠部に向かい始め、破堤拡幅が開始する。この流れが開口部下流側に作用することで下流への拡幅が進行するとともに、開口部下流側に作用した流れが氾濫域上流へはね返る様子も確認出来、この流れにより開口部上流側の侵食も生じている。また氾濫流量についてもStep2より増加をはじめている。

[Step3] 破堤拡幅速度が速くなり、氾濫流量も急激に増加している。開口部下流区間に氾濫流の主流が存在し、この流れが作用することで上流よりも下流への破堤拡幅が多くを占めている。また開口部上流区間は緩やかな流れとなっており、これは河床勾配が急な河道の特性である¹²⁾。拡幅速度や氾濫流量の増加傾向は、両ケースともに明瞭な差は見られなかったが、堤内内部の崩壊履歴も

含めた詳細な進行過程については次項で考察を行う。

[Step4] 河道水位が低下し、河道流量のうち半分以上が氾濫流量として流出していることもあり、拡幅速度は徐々に遅くなっている。

4. 堤体材料の相違が破堤現象に与える影響

(1) 通水から越水までの堤体内浸透

本論文では越水による破堤を対象としているが、越水が主要因であるものの浸透が破堤を助長した可能性を否定出来ないとされている災害事例¹³⁾や、一連の降雨により堤防の設計を超えるような外力（計画高水位以上）が

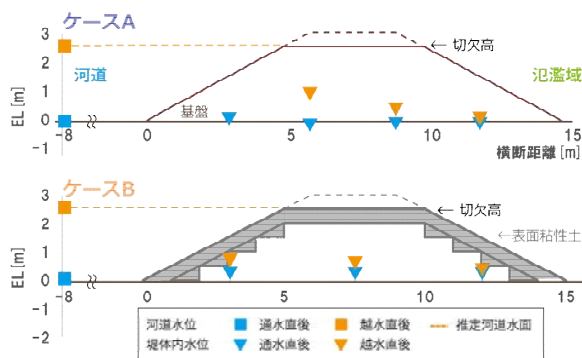


図-6 堤体内水位

繰り返し作用する中で越水に至った事例⁴⁾もあることから、越水破堤を対象とする場合であっても河川水の堤体内浸透の影響把握は重要である。

図-6に通水直後と越水直後における切欠部横断面における河道水位、および堤体断面内の浸透状況を示す。

ケースAでは堤体および基盤ともに透水性が高く、河道水位の上昇に伴い、堤体内は河道側の水位が高く裏法尻に向けて下に凸の水面形となっている。また図-4からも（上から2段目のケースAの天端崩壊過程）からも、浸透により裏法尻の一部が湿潤している様子も確認される。

ケースBでは越水直後においても堤体内水位の上昇量は小さく、また水面形は横断方向にほぼ水平であった。これは堤体表面に透水性が低い粘性土があることにより、河道からの浸透が抑制される一方、基盤からの浸透により水位が上昇したためと考えられる。裏法尻近傍ではケースAよりも水位が高くなっているが、これは堤体表面の透水性が低いため、浸透水が堤体から抜けづらく、滞留していたためと考えられる。

今回は越水破堤現象に着目しており、越水までの時間になるべく短くなるように水位を上昇させたが、堤体材料の相違により堤体内水位の上昇過程に違いが見られた。これより例えば越水させずに河道水位が高い状態で長時間通水を行った場合、浸透により堤体強度が低下することで、その後の越水破堤現象に影響を与えていた可能性もある。また浸透に対する強化工法（ドレーン工法など）では、浸透に対してだけでなく、結果として越水に対しても粘り強さを発揮する可能性もあり、越水に対して少しでも決壊までの時間を引き延ばす検討においては、越水だけでなく、同時に浸透も考慮した複合的な要因を考慮することが重要であることを示唆するものである。

(2) 越水による堤体侵食過程

図-7に加速度センサーの記録より推定した切欠部断面における越水から堤防決壊に至るまでの崩壊過程を示す。

ケースAでは越水と同時に裏法面の侵食が始まり、裏法面～裏法肩～表法肩へと侵食が進行している。堤体下刻よりも天端後退が進行し、基盤の洗掘も生じていない。

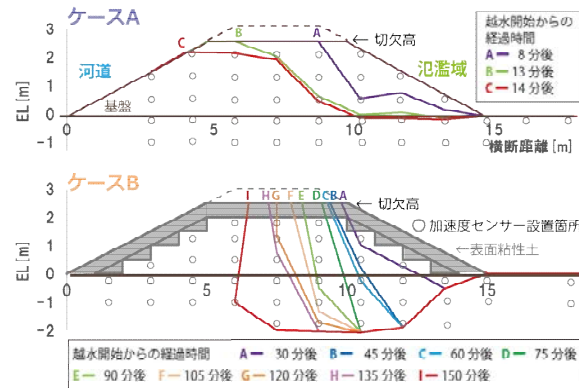


図-7 加速度センサー記録による切欠部断面の侵食過程

ケースBでは越水開始から30分以降、15分毎の切欠断面形状A～Iとして示しており、これは図-5の観測時系列変化のうち破堤開口幅で示したA～Iに対応している。越水開始から徐々に裏法面が侵食されAの時間帯では砂礫部分まで到達している。一方でケースAではこの段階に到達するため5分程度であり、堤体の表層だけでも粘性土の場合、越流水による裏法面侵食速度が遅くなることが期待出来る。

B～Dの時間帯では天端崩壊過程へと移行する。天端が後退するよりも基盤侵食が顕著であり、実験観察からも越流水が天端から落下するように流れることで、基盤が洗掘されていたと考えられる。

E～Iの時間帯でも同様のプロセスを経て、堤体が切り立った状態で侵食が徐々に河道側へと進んでいる。なお天端の侵食過程において間欠的に現象が進行していることも確認された。またIでは天端の粘性土及び堤体上部が崩壊せずにひさし状になっていることも確認された。そしてIの数分後には表法肩が崩壊し、破堤拡幅段階へと移行する。

越水から決壊開始まではケースAと比べると2時間程度長くなっていることから、堤体表層の一部を耐侵食性のあるものにすることで、越水に対する粘り強さを期待出来ると言える。

(3) 越水による堤体侵食量と越流量の関係

図-7の越流水による侵食過程の比較より、堤体材料の相違により、決壊までの時間に違いが生じることが示された。しかし図-5に越流水深は徐々に変化するため作用外力は同一条件ではなく、また侵食過程も異なることで侵食量に相違があり、越流時間のみで両ケースの現象を単純に比較・評価することは困難である。

よってここでは堤体崩壊を示す指標として単位幅侵食量（加速度センサーの結果から推定）、外力の指標として単位幅累積越流量を用いた評価を行う⁹⁾。なお破堤拡幅開始前の越流量は極めて少なく河道流量観測の差から算出するのが困難なこと、また破堤拡幅を伴わない正面越流に近い現象のため、ここでは堤体からの越流水深を

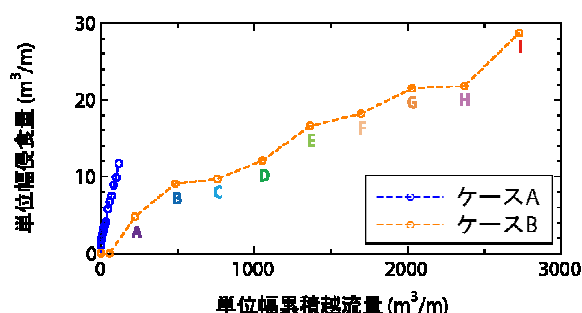


図-8 単位幅侵食量と累積単位幅越流量

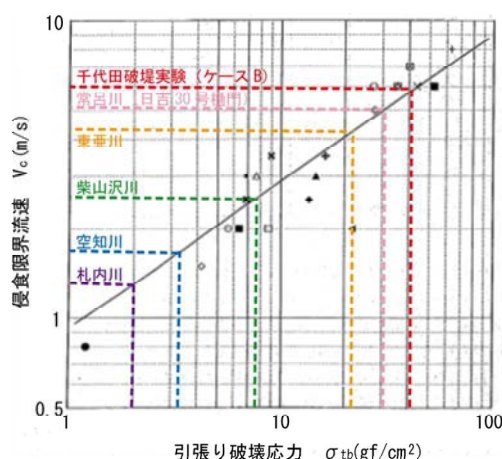


図-9 引張破壊応力より推定される侵食限界流速

用いて本間の越流公式¹⁴⁾より算出した値を用いた。

図-8に結果を示す。ケースAでは単位幅累積越流量の増加とともに単位幅侵食量も増加、その傾きは概ね一定であり掃流現象による侵食現象と考えられる。ケースBでも単位幅越流量の増加とともに単位幅累積侵食量も増加するが、その傾きは緩く、変化も一定でなく間欠的である。なお越水から表法肩崩壊までの単位幅累積越流量は、ケースAに対してケースBが20倍程度となっている。これより堤体表面が粘性土となることで、裏法面の侵食、天端崩壊過程に対して一定の引き延ばし効果が期待出来る可能性がある。

(4) 粘性土の引張り破壊応力と侵食限界流速の推定

これまでの整理により、表面を粘性土とすることで決壊に至るまで一定の引き延ばし効果が発現する可能性を示したが、越水初期に特に粘性土の場合、どのようなきっかけで堤体侵食が始まるかは不明であるため、堤体土質に着目した検討を行う。

ここでは堤体の侵食限界流速を推定するため、堤防天端において宇多らの方法¹⁵⁾により引張り破壊応力試験を行った（ケースAについて既往実験であり未実施）。図-9に計測した引張り破壊応力および推定される侵食限界流速を示す。また参考として既往の現地調査結果（2016年北海道豪雨災害時に生じた破堤箇所等）^{3), 4), 16)}も併記する。

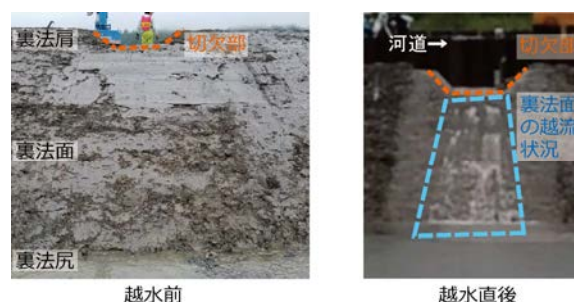


図-10 堤体表面仕上げ及び越流直後の状況

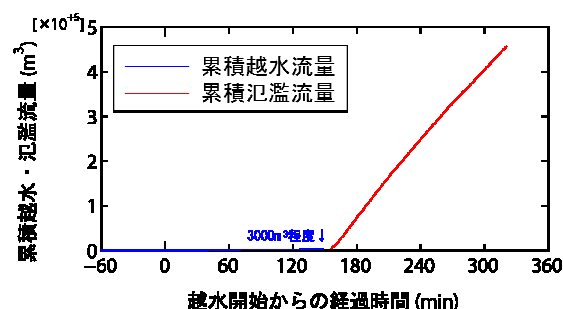


圖-11 累積越水・累積氾濫流量

本実験で用いた粘性土は、侵食限界流速が 6m/s 程度と既往現地調査結果と比較しても大きかったことがわかる。次に実験中で生じたと推定される越流部の流速について、千代田破堤実験を元に開発された破堤拡幅計算モデル⁽⁷⁾を用いて固定床として簡易に計算を行った結果、切欠部の最大流速は、床端区間では $0.7\sim 0.8\text{m/s}$ 程度、裏法面区間では $2.8\sim 3.3\text{m/s}$ 程度と考えられ、侵食限界流速に対して小さな値であった。

ここで侵食限界流速よりも実験時に堤体に作用した流速が小さかったにもかかわらず、裏法面の侵食生じた理由の考察にあたり、図-10に実験前の堤防裏法面の仕上げ、及び越流後の状況を示す。現地施工時には裏法面の不陸等が生じないように整形を行ったものの、用いた土質の細粒分が80%以上と施工性の困難さからも一部に不陸や、施工後の乾燥による一部クラック等が生じていた。その結果、越水後から裏法面において越流部の複数箇所では白濁した流れが見られ、このような箇所をきっかけとして粘性土の侵食が生じていたことから、堤体不陸の早期発見など、日頃の堤防管理の重要性を再認識するのである。

(5) 破堤拡幅段階に堤体材料が与える影響

図-11にケースBの累積越流量、および累積氾濫流量を示す。破堤拡幅に至らず越水のみであれば比較的、氾濫流量は小さいが、破堤拡幅段階に入るとその量は一気に増加し、浸水被害が甚大になると考えられる。被害規模軽減には越水から堤防決壊までの時間を引き延ばす技術¹⁸⁾のほか、破堤拡幅に至った場合でも、破堤拡幅の進行抑制や破堤開口部の荒締切工などの破堤被害軽減技術¹⁹⁾の開発が重要であり、これらの検討にあたっては破堤

拡幅のプロセスについて理解することが重要である。

図-5（上から3段目）は破堤開口幅のほか、同グラフ内に示したポンチ絵にあるように、不可視部分である堤体下層（河床から上方へ0.6m）に設置した加速度センサーの流出結果を併記している。これより天端で判読した破堤開口幅と同地点の下層がどのタイミングで崩壊しているかを把握することが出来る。

両ケースを比較すると、破堤拡幅速度について明瞭な差は見られない。また天端と堤体下層の崩壊はほぼ同時刻（破堤開口幅の線とセンサー流出時刻のプロットが同一位置）であり、堤体断面上下層がほぼ同時に崩壊し、破堤拡幅進行していたと考えられる。またケースBでは切欠より下流20m区間より下流では天端幅3mのうち1mは粘性土ではなく砂礫に切り替わるが、この区間においても拡幅速度に変化は生じていない。

これより堤体表面を被覆することで、越水初期であれば一定の侵食引き延ばし効果を期待することができる。一方で拡幅段階に移行すると、砂礫が多く占める堤体断面に直接、速い流れが作用することもあり、破堤拡幅速度を低減する効果は、今回の条件においては確認することが出来なかった。

5. まとめ

本論文では堤体材料の相違が越水破堤現象に与える影響理解を目的に、実物大規模の越水破堤実験を行った。

越流水による裏法面侵食過程では、砂礫土では裏法面侵食が顕著だが、粘性土では不陸等をきっかけとして侵食が始まるが、崩壊過程に至るまでの時間が長くなる。

天端崩壊過程において、粘性土では天端が河道側に向かって切り立った形状で後退、天端から落下する越流水で基盤も侵食されながら、間欠的に崩壊が進行し、破堤に至る時間の引き延ばし効果が期待出来る可能性がある。

表法肩まで侵食が到達すると破堤拡幅段階へと移行するが、破堤拡幅速度や氾濫流量の増加傾向については明瞭な差が見られなかった。

また堤体表面に透水性が低い粘性土が存在する場合、越水時における堤体内への浸透状況に差が見られたことから、越水を対象とした検討であっても、浸透状況の考慮が必要であると考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、十勝川実験水路アドバイザー委員会と同検討会より、多くの助言を頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 社会資本整備審議会：水災害分野における気候変動適応策のあり方について(答申)，国土交通省，2015。
- 2) 例えば，令和元年度台風19号等による被害状況等について：

- 国土交通省，http://www.mlit.go.jp/saigai/saigai_191211.html（2020年4月2日確認）
- 3) 土木学会2016年8月北海道豪雨災害調査団：2016年8月北海道豪雨災害調査団報告書，2017。
- 4) 常呂河堤防調査委員会：常呂河堤防調査委員会報告書，北海道開発局，<https://www.hkd.mlit.go.jp/ab/tisui/v6dkjr00000006el.html>（2020年4月2日確認）
- 5) 令和元年台風第19号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会(第1回)，国土交通省，http://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/gijutsu_kentoukai/index.html（2020年4月2日確認）
- 6) 関根正人，菅俊貴，松浦泰地：模擬河川堤防の決壊プロセスに与える堤体材料の礫・砂・粘土の混合比率の影響，土木学会論文集B1（水工学），vol.75，No.4，pp.949-954，2019。
- 7) 島田友典，渡邊康玄，横山洋，米元光明：堤体材料および内水状況が越水堤防決壊現象に与える影響，土木学会論文集B1（水工学），vol.74，No.4，I_1423-1428，2018。
- 8) 十勝川千代田実験水路について，国土交通省北海道開発局帯広開発建設部，https://www.hkd.mlit.go.jp/ky/kn/kawa_kei/ud49g7000000ry5o.html（2020年4月2日確認）
- 9) 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。
- 10) 河川堤防の越水破堤現象のうち破堤拡幅過程に関する実験報告書：国土交通省北海道開発局，寒地土木研究所，2012。
- 11) 島田友典，横山洋，桑村貴志：十勝川千代田実験水路における堤体材料の一部を粘性土とした越水堤防決壊実験，国土交通省北海道開発局令和元年度技術研究発表会，第63回，防-32，2020。
- 12) 島田友典，渡邊康玄，横山洋，米元光明：河道形状が堤防決壊拡幅現象に与える影響，土木学会河川技術論文集，第25回，pp.523-528，2019。
- 13) 鬼怒川堤防調査委員会：鬼怒川堤防調査委員会報告書，関東地方整備局，2016。
- 14) 水理公式集（平成11年度版），土木学会，pp.132-133，1999。
- 15) 宇多高明，望月達也，藤田光一，平林桂，佐々木克也，服部敦，藤井政人，深谷涉，平館治：洪水流を受けた時の多自然河岸防御工・粘性土・植生の挙動，土木研究所資料，第3489号，1997。
- 16) 笹岡信吾，鈴木淳史，上野俊幸，諏訪義雄：河川堤防の築堤材料や管理状況等が越流時の侵食耐浸食力に与える影響についての考察，土木学会河川技術論文集，第24巻，pp.601-606，2018。
- 17) 柿沼孝治，飛田大輔，横山洋，井上卓，武田敦史：千代田破堤実験と数値計算モデルの開発，寒地土木研究所月報，第732号，pp.10-19，2014。
- 18) 水防災意識社会再構築ビジョン，国土交通省，<http://www.mlit.go.jp/river/mizubousaivision/>（2020年4月2日確認）
- 19) 堤防決壊時に行う緊急対策工事の効率化に向けた検討資料（案）：国土交通省北海道開発局，寒地土木研究所，2018。（2020. 4. 2受付）