

千代田実験水路における粘着性を有する 堤体材料を用いた正面越流破堤実験

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 寒地河川チーム 神原 柚乃
北海道開発局 帯広開発建設部 亀井 尚

破堤被害軽減技術を検討する際に重要な情報となる堤体材料の粒度分布特性が破堤現象に与える影響を明らかにすることを目的に、実物大規模の千代田実験水路を用いて細粒分を多く含む横断堤を用いた越水破堤実験を実施し、破堤口拡幅初期までの破堤進行過程の整理を行った。これより細粒分を多く含む堤体は裸堤にも関わらず越水に対して一定の耐力を示すものの、基盤が洗掘されると破堤現象が急速に進行することが確認された。

キーワード：越水破堤、堤体材料、千代田実験水路

1. はじめに

近年、水害が激甚化・頻発化しており、今後も気候変動の影響による降水量の増大等が懸念される中¹⁾、河道等の整備が進んでいる今日でも洪水被害が激甚化し、全国各地で破堤による被害が多数、発生している²⁾。

平成28年8月北海道豪雨災害では9河川で破堤が生じ、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では堤防からの越水が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堤体材料の相違（砂質土か粘性土）が破堤に至ったかどうかの要因の一つであるとしている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」においても、越水して破堤に至らなかつた箇所の調査から、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重要であると指摘している²⁾。

堤体材料の相違に着目した越水破堤に関する研究は例えば関根ら⁵⁾、島田ら⁶⁾、神原ら⁷⁾や牧川ら⁸⁾が粘性土を用いた破堤実験により検討を進めているが、いずれも縮尺模型実験であるため水理量の相似則を満足した場合であっても堤体強度の相似則などの条件をそろえることが難しく、実物大規模の堤防を用いた検討が重要である。

本論文では実物大規模の十勝川千代田実験水路⁹⁾において、細粒分を多く含む材料で築造した横断堤を用いて正面越流による越水破堤実験を実施し、破堤口の拡幅初期段階までの破堤進行過程を整理した。さらに堤体材料の違いが越水破堤現象に及ぼす影響を明らかにするため、堤体材料として砂礫を用いた既往の横断堤越水破堤実験（以下、既往砂礫実験と称す）¹⁰⁾との比較を行った。

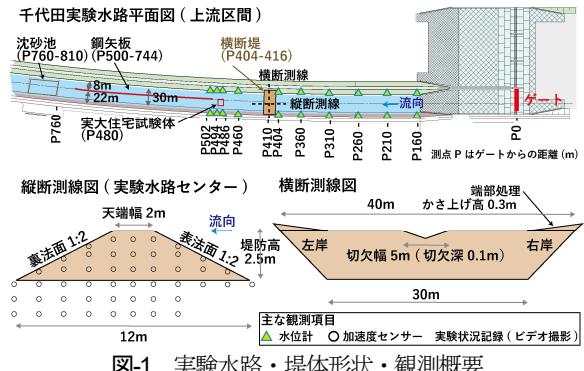


図-1 実験水路・堤体形状・観測概要

2. 越水破堤実験の概要

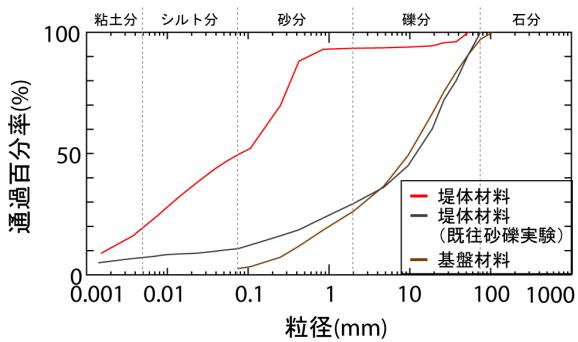
(1) 実験水路・堤体形状概要

図-1に実験水路および堤体形状を示す。堤防は高さ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）において築造した。築造方法は通常の堤防と同様に1層あたりの締固め後の仕上がり厚が30cmとなるように施工した。締固め度は平均91.3%（全12か所で実施し、最小90.3%、最大92.6%）であり適切に締固められていることを確認した。

破堤のきっかけとして天端中央に幅5m、深さ0.1mの切欠を設けた。さらに横断堤と水路の境界から破堤しないように端部処理として0.3mのかさ上げを行った。

(2) 観測概要

図-1に観測概要を示す。実験前は堤体および河床の土質試験、通水中は河道および氾濫域水位、ビデオ等による状況撮影、加速度センサーを用いた破堤形状の時系列計測⁶⁾、通水前後には堤防・落掘等の形状測量を行った。



	堤体材料 (既往砂礫実験)	基盤材料
石分 (%)	0.0	0.0
礫分 (%)	6.6	70.6
砂分 (%)	43.8	18.6
粘土シルト分 (%)	49.6	10.8
土粒子密度 (g/cm³)	2.370	2.692
透水係数 (m/s)	4.18E-08	7.47E-03
液性限界 (%)	89.7	-
塑性限界 (%)	55.7	-
塑性指数	34.0	-
粘着力 (kN/m²)	29.9	-
内部摩擦角 (度)	42.1	-

図-2 堤体および河床材料の土質試験結果

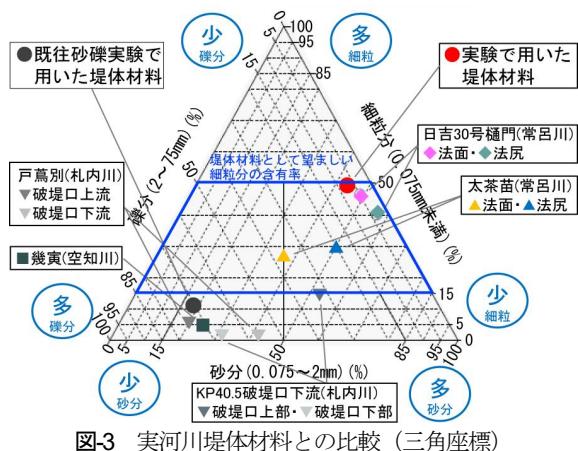


図-3 実河川堤体材料との比較（三角座標）

(3) 堤体および基盤材料

図-2に土質試験結果を示す。堤体材料の細粒分は50%程度、透水係数は 10^{-8} m/sオーダーである。基盤は実験水路の河床材料である砂礫で構成されている。また既往砂礫実験の試験結果も併記するが細粒分は10%程度である。

今回の実験で用いた堤体材料が実際に供用されている堤防と比較して、どこに位置付けられているかを把握することを目的に図-3に今回の堤体材料の試験結果のほか、平成28年8月北海道豪雨¹¹⁾で堤体侵食や破堤による被害が生じた箇所の堤体材料を示す。これより既往砂礫実験を含め、今回選定した堤体材料は供用されている堤体材料と比較しても大きく異なっておらず、土質選定は妥当であったと考えられる。

(4) 通水概要

通水は堤防天端から0.5m下がりの高さ2.0mまで湛水させ、通水を5分ほど停止させて水面が安定した後、切

欠部での越流水深が30cm程度になるように4m³/sを通水した。ここで越流水深30cmは粘り強い河川堤防の越水に対する性能の評価の目安となる外力「越流水深30cmに対して越流時間3時間」を参考とした¹²⁾。

当初はこの条件で破堤に至るまで実験を行う計画であったが、越水から3時間経過しても破堤に至らなかったため、いったん通水を止めて堤体形状を測量した。その後、再通水し破堤に至るまで流量を段階的に増やし続け、破堤口拡幅が落ち着いた時点で実験を終了した。

3. 越水破堤進行過程

図-4に実験水路の上流端から通水するゲート流量、氾濫流量、越流水深、破堤口幅の時系列変化を示す。ここで越流水深は堤体上流水位（図-1のP404）と横断堤縦断側線の天端中央の高さとの差より求めている。図-5に上空から撮影した代表的な時刻の実験状況を示す。図-6に加速度センサーの記録を用いて推定した切欠部における破堤進行過程および通水前中後の縦断形状を示す。

ここでは通水開始から越水、堤体侵食、破堤、破堤口拡幅までの進行過程について述べる。

(1) 越水から通水一時停止まで（時刻(A)～(F)）

図-5および図-6より越水開始8分後の時刻Cでは裏法面の侵食が確認出来、時刻Dではさらに侵食が進行していることが確認出来るが、これ以降は目視でも加速度センサーの結果からも顕著な堤体侵食は確認できなかった。

そこで180分後の時刻Eで通水を止め、越流水が大幅に減少した時刻Fで堤体形状の測量を行った。その結果を図-6に示す。これより裏法面が3段程度の階段状に侵食されていることが確認出来る。併せて堤防施工時に1層30cmで締め固めた締固層の境界位置を示す。これより締固層の境界と階段状の侵食が一致している箇所もあることから、堤体の施工が裏法面の侵食に影響をあたえる1つの要因と考えられる。

また泉ら¹³⁾によると急勾配斜面上に周期的なステップ状の地形、サイクリック・ステップが形成されることがあるとしている。これが形成されると侵食の進行が抑えられるとも言われていることから、今回の裏法面の侵食が進まなくなった要因の1つである可能性がある。今後は越流水による裏法面の階段状の形成過程や条件についても検討を行なうことが重要である。

(2) 再通水から破堤まで（時刻(G)～(J)）

上記の測量後、再通水し破堤するまで流量を段階的に増加させた。図-6に示すように時刻G（越流水深49.6cm）で基盤洗掘が確認された。9分後の時刻H（越流水深57.6cm）ではさらに進行し、洗掘は1.7m程度と推定でき、堤体が切り立っていたと考えられる。5分後の時刻I（越

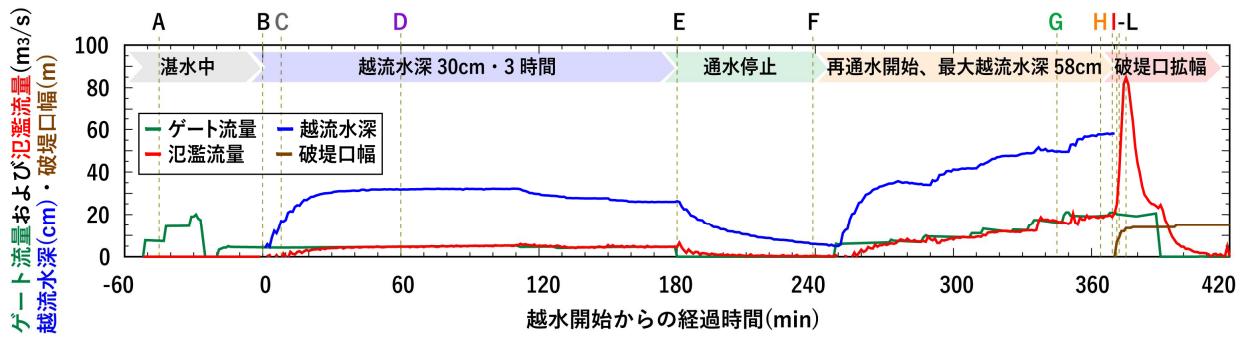


図-4 時系列変化（ゲート流量、氾濫流量、越流水深、破堤口幅）

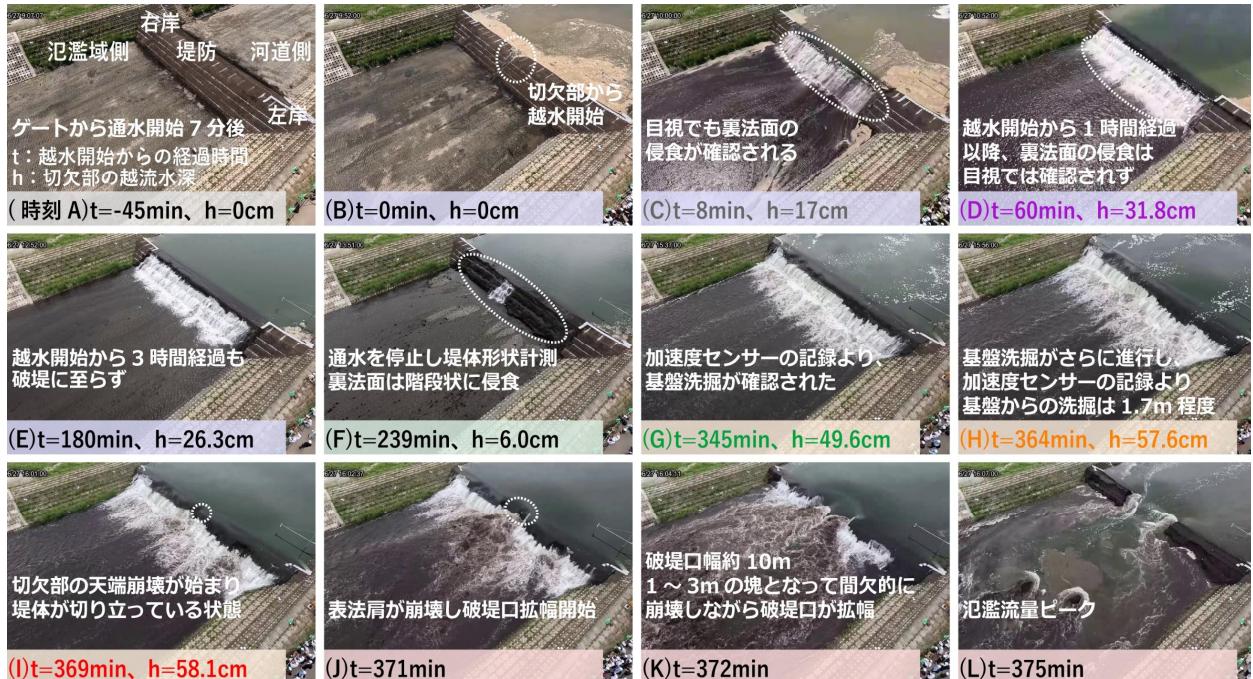


図-5 破堤進行状況

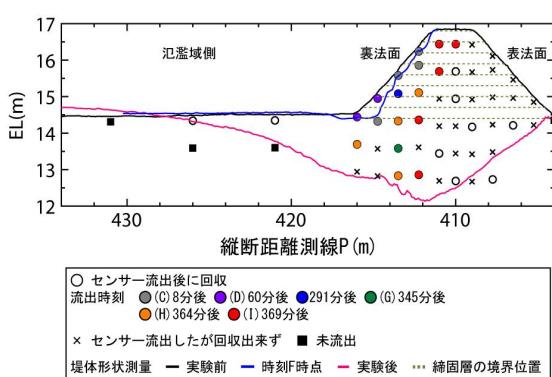


図-6 加速度センサーの記録を用いた破堤進行過程の推定および通水前中後の堤体縦断形状

流水深 58.1cm) では天端の崩壊が始まった。そして 2 分後の時刻 J で図-5 に示すように表法肩周辺の崩壊が確認された。その結果、堤防高が 2.5m を下回ることで堤防としての機能を失い、河道からの流れが表法肩周辺の崩壊箇所に一気に集中し、破堤口拡幅へと移行した。

ここまででの結果から、基盤の洗掘以降、破堤現象が急速に進行していることが確認された。これにより、もし

基盤洗掘が生じていなければ、破堤に至るまでの時間がさらに長くなっていた可能性があると考えられる。従来は浸透や基盤漏水による破堤において基盤の状態が大きく影響するとされてきたが、本実験結果は越水破堤においても基盤条件を考慮することの重要性を示唆している。

(3) 破堤口拡幅から実験終了まで (時刻 (J) ~ (L))

図-7に動画から読み取った表法肩の破堤口幅および氾濫流量の時系列変化を示す。併せて破堤口幅については崩壊 1 回あたりの変化量を、氾濫流量については 1 分毎の変化量を示す。これらより破堤口は 1~3 m 程度の土塊が間欠的に崩壊することで拡幅しており、拡幅開始から約 10 分で最終的な破堤口幅に到達したことが分かる。

また図-6に実験後の縦断形状を示すが、落掘は裏法肩あたりで深さ最大 2.3m 程度であり、これが形成されたタイミングは加速度センサーの結果より、破堤口の拡幅開始以前であることが推察される。これは実災害において破堤に至らなかった場合でも、堤防高程度の基盤洗掘が生じている可能性があり、災害後の現地調査や復旧作業に留意する必要がある。

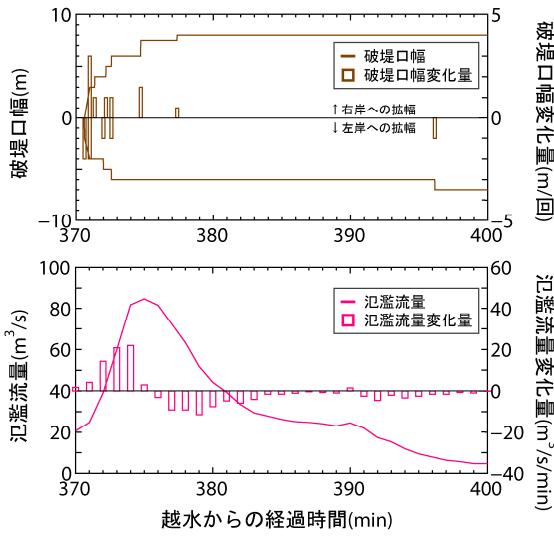


図-7 破堤口幅と氾濫流量の時系列変化

4. 堤体材料の相違が越水破堤現象に与える影響

ここまででは堤体材料に細粒分が多く含まれる条件での越水破堤実験の結果を示した。実在する堤防は図-3に示すように様々な材料により構成されており、堤体材料の相違が破堤現象に与える影響の理解は被害軽減技術の検討にとって重要である。そこで本節では既往砂礫実験と比較し両者の現象の相違について述べる。なお実験条件の詳細は参考文献を参照されたい¹⁰⁾。

図-8に既往砂礫実験の越水から破堤に至るまでの進行状況、図-9に加速度センサーから推定した切欠部中央断面の崩壊進行過程、図-10に破堤口幅および氾濫流量の時系列変化を示す。

越水開始直後の時刻aでは裏法面の侵食が見られる。越水開始2分後の時刻bでは裏法面の侵食が主に鉛直方向に進行し、天端の侵食も始まった。さらに越水開始4分後の時刻cでは縦断測線上の堤体が概ね崩壊し、破堤口拡幅段階へ移行した。今回の実験同様、越流水深が30cmとなるようにゲート流量の設定を行ったが、30cmに到達する前に破堤に至り最大越流水深は約6cmであった。

これは細粒分が10%程度と粘着性をほとんど有していないことから、越流に対して粘ることなく掃流により堤体の侵食が急速に進行したと考えられる。そのため河道側への天端の崩壊も早く、また堤防が切り立つことがなかったと考えられる。

破堤口の拡幅については細粒分を多く含む場合には塊となって間欠的に崩壊し、拡幅が進行していたのに対し、既往砂礫実験では破堤口を流れる氾濫流により堤体が掃流されながら破堤口が徐々に拡幅していくことが確認された。今回の実験に比べると破堤口拡幅速度はやや遅かったがこれは単に材料の相違だけでなく、外力が大きく異なること（最大越流水深は58cmと6cm）、破堤開始

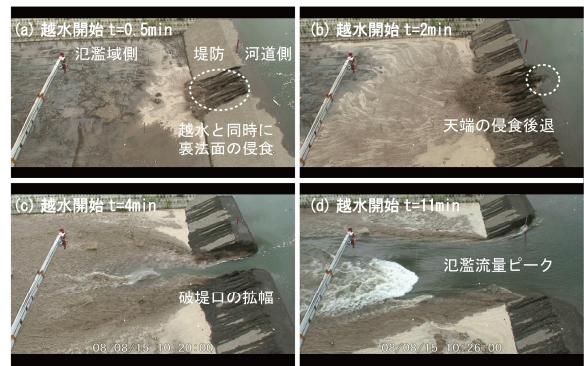


図-8 破堤進行状況（既往砂礫実験）

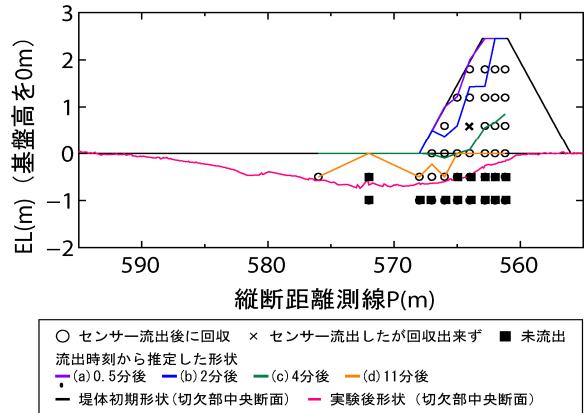


図-9 加速度センサーの記録を用いた破堤進行過程の推定および通水前中後の堤体縦断形状（既往砂礫実験）

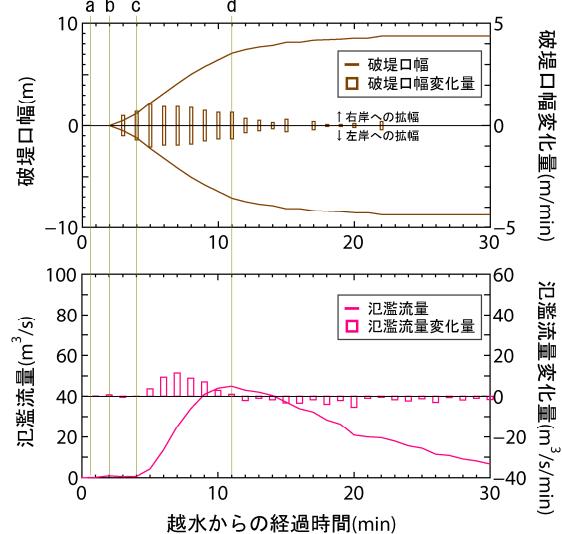


図-10 破堤口幅と氾濫流量の時系列変化（既往砂礫実験）

時には既往砂礫実験と異なり裏法面全体が侵食され基盤も堤防高程度まで洗掘していたことから、拡幅しやすい条件であったと考えられ、今回の結果から破堤口の拡幅速度を単純に比較することは困難である。

また図-9に切欠部中央断面の最終縦断形状を示すが、落掘の洗掘深が最も大きい箇所は堤防より下流の氾濫域側に位置し、その深さは0.8m程度であった。また落掘

が形成されたタイミングは氾濫流量ピーク頃と推定される。今回の実験結果と比較すると落掘の最大洗掘深やその縦断位置、洗掘タイミングに大きな違いが見られるが、この相違は堤体材料の違いに加え、越流水深の差による影響も考えられる。

5. まとめ

本論文では実物大規模の十勝川千代田実験水路を用いて、細粒分を多く含む堤体材料で築堤した横断堤の越水破堤実験を実施し、破堤進行過程を整理した。

堤体に細粒分を多く含む場合、越流水深 30cm で 3 時間経過しても裏法面の侵食は見られたが破堤には至らず、一定の耐力を示した。その後、越流水深を 58cm まで大きくすると、堤防は切り立つように侵食し、さらに天端からの落下する流れで基盤の洗掘が生じた後、急速に現象が進行し破堤に至った。これは従来、浸透や基盤漏水による破堤において基盤の状態が大きく影響するとされてきたが、越水破堤においても基盤条件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。

なお筆者らは氾濫流量に大きく依存する最終破堤口幅の推定式の更新に向けて、破堤口幅に影響を与える支配的な要因を明らかにするため事例の収集整理を行っており、堤体材料の細粒分含有率も破堤口幅に影響を与える可能性があることを示している¹⁴⁾。

そのため今回は横断堤を用いて越水から破堤口拡幅の初期段階までの現象であったが、今後は細粒分を多く含む堤防を対象に、河道流れを考慮した横越流による越水破堤口拡幅実験実施を計画している。

謝辞：本研究を行うにあたり、十勝川千代田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。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 気候変動を踏まえた治水計画に係る技術検討会：気候変動を踏まえた治水計画のあり方(提言)，国土交通省，2021 改訂。

- 2) 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：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報告書，2020.
- 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) 常呂川堤防調査委員会：常呂川堤防調査委員会報告書，北海道開発局，2017.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 神原柚乃，島田友典，前田俊一，大串弘哉，高橋賢司，猪子長：堤体材料および基盤材料が堤防決壊に与える影響，土木学会河川技術論文集，第 30 卷，pp.197-202, 2024
- 8) 牧川星朗，前田拓人，南野仁，音田慎一郎，肥後陽介：異なる粒度分布を有する堤防の越流侵食過程に関する実験的研究，令和 6 年度土木学会全国大会，第 79 回年次学術講演会公演概要集，II-90, 2024.
- 9) 十勝川千代田新水路，国土交通省北海道開発局帯広開発建設部，<https://www.hkd.mlit.go.jp/ob/tisui/kds/chiyodashinsiro/ctl1r0000002hgy.html> (2026 年 1 月 9 日確認)
- 10) 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，土木学会水工学論文集，第 53 卷，pp.871-876, 2009.
- 11) 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.
- 12) 粘り強い河川堤防の構造検討に係る技術資料（案）ver1.1，国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室，土木研究所地質・地盤研究グループ（土質・振動），2023 年.
- 13) 泉典洋，横川美和，Gary PARKER：基盤岩上に形成される周期的ステップ地形，土木学会論文集 B1(水工学), Vol68, No.4, I_955-I960, 2012.
- 14) 島田友典，神原柚乃，前田俊一：堤防決壊事例および実験結果に基づく決壊口幅と河道・堤体・水理条件の関係，国土交通省北海道開発局令和 6 年度技術研究発表会，第 68 回，安-65, 2025.