

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 —堤防決壊時の緊急対策シミュレーションにおける 堤防決壊口幅設定は妥当か?—

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
寒地土木研究所 寒地水圏研究グループ 前田 俊一

管理する河川を対象に破堤時の対応を机上訓練する堤防決壊時の緊急対策シミュレーションにおいて、破堤口幅の設定が重要である。破堤口幅は既往事例に基づき川幅と紐づけた経験式を用いているが、算出結果と大きく異なる事例も見られる。本論文では破堤口幅に影響を与える主な要因を明らかにすることを目的に、過去の破堤事例から河道形状、堤体形状や材料、洪水特性などのデータを収集し、破堤口幅との関係の整理を行った。

キーワード：堤防決壊時緊急対策シミュレーション、破堤口

1. はじめに

河道等の整備が進んでいる今日でも豪雨等による洪水被害が激甚化しており、全国各地で破堤による被害が多数、発生している。例えば2019年10月令和元年台風第19号による洪水では、全国で142箇所もの河川堤防が破堤するなど、河川からの氾濫により約35,000haが浸水し、甚大な被害をもたらした¹⁾。今後、気候変動の影響により、洪水による被害がさらに頻発化・激甚化することが懸念されている²⁾。

このような状況の中、万が一、破堤した場合における緊急対策技術の向上および蓄積・伝承を図ることを目的として、2007年より全国の直轄河川事務所において毎年、堤防決壊時緊急対策シミュレーションを実施している。これは各河川事務所が管理する河川を対象に、破堤した場合の緊急復旧計画、資器材の調達や配置等の対応策について、机上で訓練を行うものである。

また2020年、国土交通省は水災害対策の政策として流域全体で行う治水対策である「流域治水」を進めていくこととした³⁾。集水域と河川区域のみならず、氾濫域も含めて一つの流域として捉え、その流域全員が協働して①氾濫をできるだけ防ぐための対策、②氾濫した場合を想定し被害対象を減少させるための対策、③氾濫の発生に際し被害の軽減・早期復旧・復興のための対策を、ハード・ソフト一体で多層的に取り組むこととしている。

これらの検討を行うにあたり重要となるのは破堤口幅の設定である。緊急復旧計画を立てるには、破堤口を縮

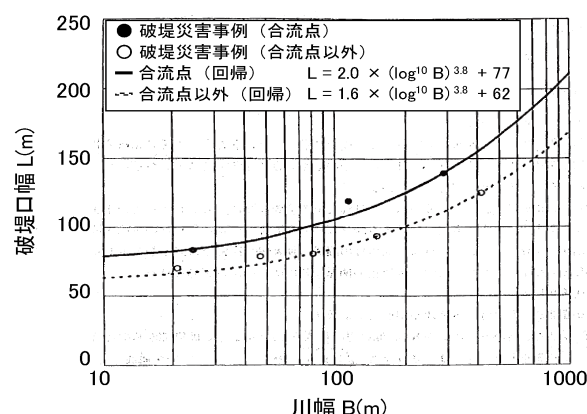


図-1 破堤口幅と川幅の関係および最終破堤口幅を求める経験式⁴⁾ (参考資料に加筆)

め切るために必要となる水防資材等の量を見積もる必要があり、破堤口幅の大小が重要である。また浸水面積などを予測するには氾濫流量を正確に見積もる必要があり、氾濫流量は破堤口幅の大小により大きく異なる。破堤口幅は現在、図-1⁴⁾に示す経験式を用いて算出している。これは過去の限られた破堤事例をもとに、最終破堤口幅を川幅と紐づけたものであるが、岩倉ら⁵⁾は近年の主な破堤事例20箇所を同図にプロットし、同じ川幅でも破堤口幅が異なることを指摘し、破堤口幅に及ぼす川幅以外の要因を明らかにすることが重要としている。

本論文では破堤口幅に影響を与える支配的要素を明らかにするための第一歩として、越水破堤事例および越水破堤実験をもとに破堤口幅のほか河道特性、堤体形状や材料、洪水時の水理量を収集し関係性の整理を行った⁶⁾。

表-1 越水破堤事例収集一覽

[illegible]

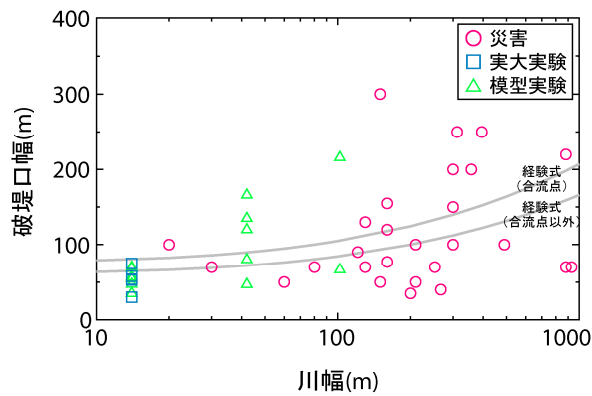


図-2 破堤口幅と川幅の関係

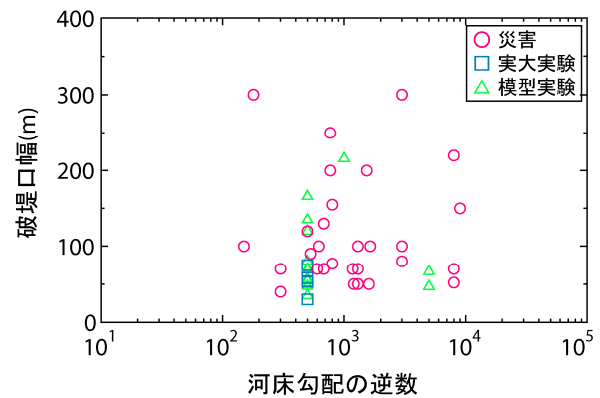


図-3 破堤口幅と河床勾配の関係

2. 越水破堤事例の収集

表-1に越水により破堤した災害、および筆者らがこれまでに実施してきた越水破堤実験の事例を示す。いずれのデータも公表されており入手可能なものである。なお破堤口幅と各指標との関係を整理することを目的としていることから、数値データのうち破堤口幅しか見つけることが出来なかった事例については除いている。

ここでいくつかの注意点を示す。川幅、河床勾配および計画高水勾配について、参考文献等から見つけることが出来なかった場合は写真や地図等からの読み取り、および河川整備計画等を参考に算出しており、これらは表-1においてグレーに着色した。

堤体材料の細粒分含有率は、堤防調査委員会等で破堤口の上下流断面や同一断面の複数個所で土質試験を行っている場合、土質試験結果を単純平均して算出している。

最大流量については災害事例ではピーク流量を、実験では一定流量を通水しているため、その値を示す。

また洪水継続時間は災害事例では氾濫危険水位を超えてから下回るまでの時間、実験では越水開始から通水停止までの時間と定義した。

なおデータを見つけることが出来なかったところは空欄とし、後述のグラフではデータがあるものだけをプロットしている。

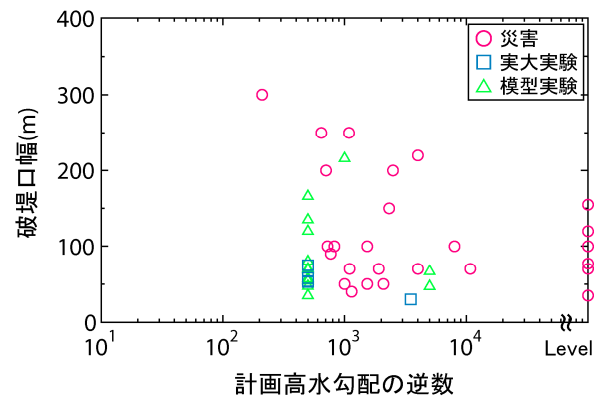


図-4 破堤口幅と計画高水勾配の関係

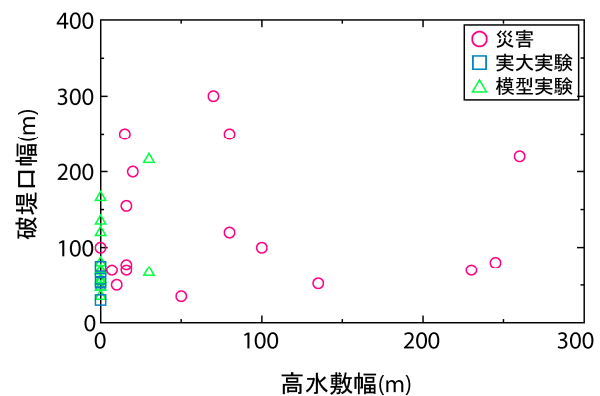


図-5 破堤口幅と高水敷幅の関係

3. 破堤口と各指標の関係

(1) 破堤口幅と河道特性の関係

図-2に破堤口幅と川幅との関係を示す。経験式同様、川幅が広くなるに従い、破堤口幅が大きくなる事例も見られるが、同程度の川幅であっても破堤口幅が数倍以上異なる事例が存在する。将来的には経験式の更新も念頭におきつつ、その際には川幅以外の指標も考慮する必要があると言える。

図-3に破堤口幅と河床勾配、図-4に計画高水勾配との

関係を示す。河床勾配については明瞭な関係性は見られないが、計画高水勾配（水面勾配）については勾配が急になるに従い、破堤口幅が大きくなる事例も見られる。これは河道から破堤口に向かう流れが堤体に作用して破堤口の拡幅が進行する²⁹⁾ためと考え、水面勾配（＝河道の流れの勢い）とも関係性があると言えそうである。また河床勾配ではなく水面勾配を用いることで背水影響を受けた事例についても評価が出来る可能性があると考えられる。なお今回は計画高水勾配を用いているため破堤時の実際の水面勾配ではないことに留意が必要である。

図-5に破堤口幅と高水敷幅（0mは高水敷が無いこと

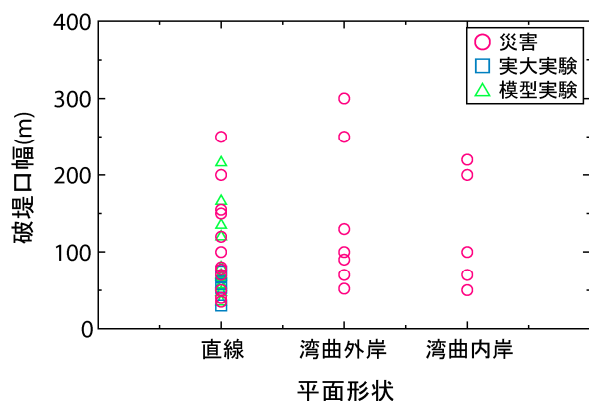


図-6 破堤口幅と河道平面形状の関係

を示す) との関係を示す。高水敷幅が狭くなるに連れ、破堤口幅が大きくなる事例も見られる。これは島田ら²³⁾が行った模型実験および数値解析の結果と同様であり、高水敷幅が狭くなるに連れ、高水敷上だけでなく低水路の勢いのある流れも破堤口に向かうことで、破堤口周辺へ作用する外力が大きくなるためと考えると理解がしやすい。なお高水敷幅と川幅の間には相関関係があると考えられるため、今後はこれらも含む指標間での多重共線性を確認し、分析を行う必要があると考えられる。

図-6に破堤口幅と平面形状の関係を示す。今回は直線か湾曲内岸・外岸かのみで分類しており、明瞭な関係性は見られないが、坂野²⁷⁾は湾曲度がきつくなると破堤口拡大速度が大きくなるなど示していることから、湾曲度に着目した整理も必要と考えられる。

(2) 破堤口幅と堤体形状・材料の関係

図-7に破堤口幅と堤防高、図-8に破堤口幅と天端幅との関係を示す。これらの指標が大きくなるに連れ破堤口幅が小さくなる事例が見られる。この要因として、堤防高や天端幅はいずれも堤防断面積の大きさを表す指標であり、これらが大きいほど破堤口を拡幅するために必要な侵食土量が増加するため、結果として破堤口幅が小さくなることを示唆している。

一方、堤防高が高くなると堤内外の水位差が大きくなり、破堤開口部に作用する外力が大きくなることを意味する。また天端幅については河川管理施設等構造令により計画高水流量に応じて天端幅の最低基準が定められていることから、こちらも天端幅が広がると破堤口に作用する外力が大きくなると考えられる。そのため堤防断面積が大きくなることで破堤口が拡幅しにくくなる条件と、破堤口に作用する外力が大きくなる条件が併存することになり指標の評価には留意が必要である。

図-9に破堤口幅と堤体材料の細粒分含有率の関係を示す。災害事例では細粒分含有率が大きくなると破堤口幅が小さくなる傾向も見られる。これは例えば2016年8月北海道豪雨において常呂川直轄区間において堤防からの越水が7箇所確認されているが、破堤に至ったのは柴山

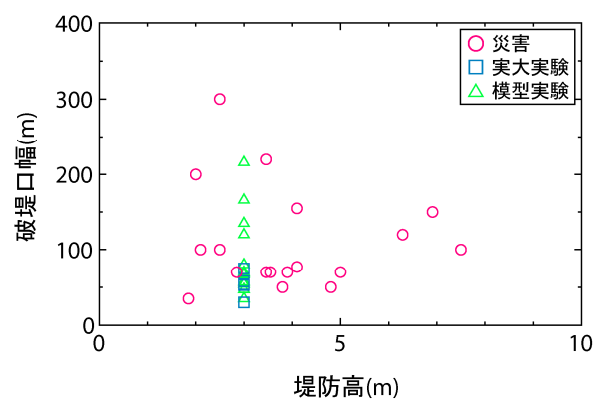


図-7 破堤口幅と堤防高の関係

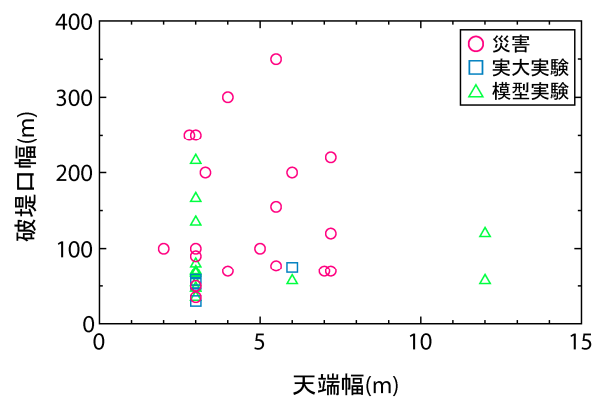


図-8 破堤口幅と天端幅の関係

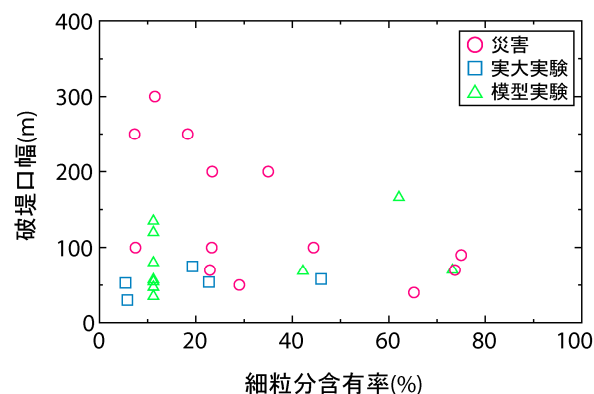


図-9 破堤口幅と堤体の細粒分含有率の関係

沢川の1箇所であった。これについて破堤に至ったかどうかの要因の1つとして堤体材料の相違（砂質土か粘性土）があるとしており¹⁴⁾、破堤口拡幅においても材料の相違が影響する可能性がある。

一方で実験では明瞭な関係は見られなかった。これは実大実験では堤体の一部を粘性土とした条件であること、模型実験では粘着力の影響がより大きくなることで堤体強度の相似則等の条件をそろえることが難しいことなどから、今後は実大実験などによる評価が重要と考えられる。

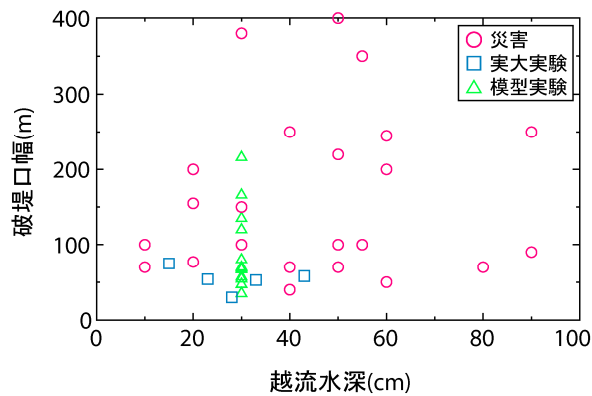


図-10 破堤口幅と越流水深の関係

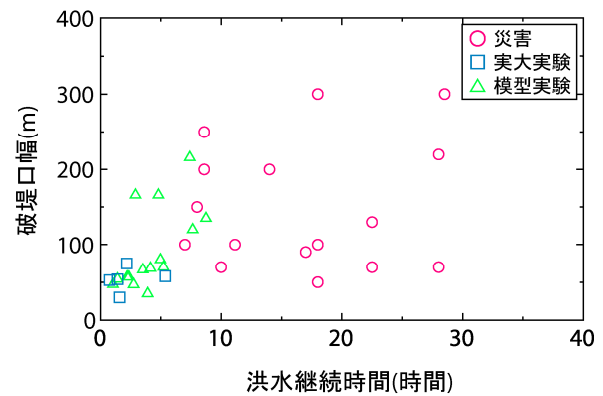


図-13 破堤口幅と洪水継続時間の関係

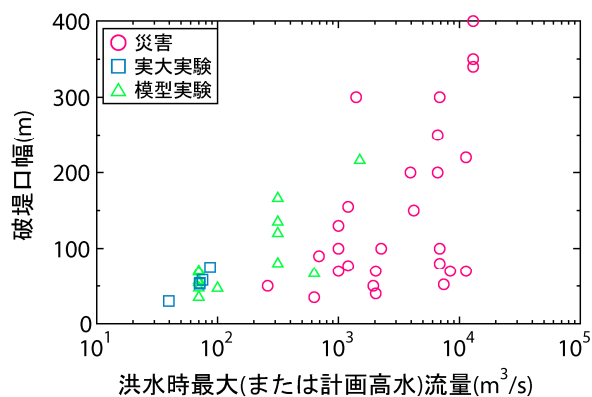


図-11 破堤口幅と河道流量の関係

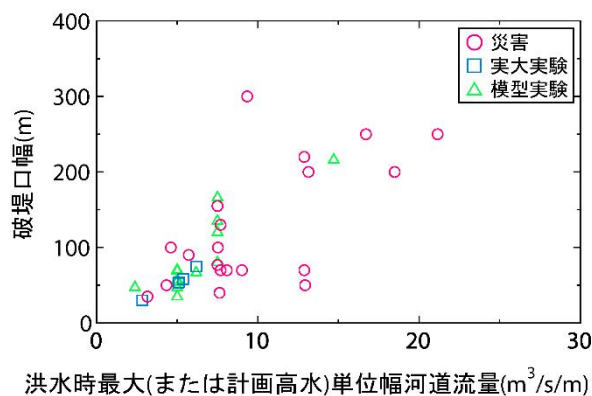


図-12 破堤口幅と単位幅河道流量の関係

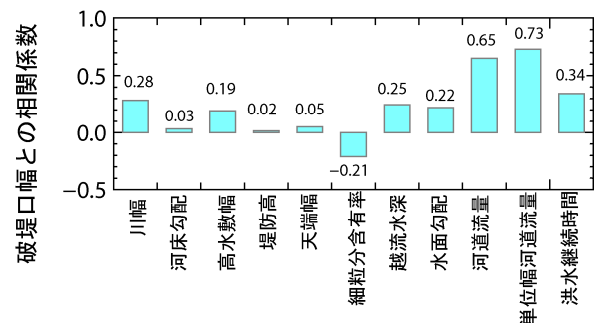


図-14 破堤口幅と各指標の相関関係

気に流れ込み破堤口の拡幅が始まること、また藤田²⁹⁾も述べているように破堤口拡幅は土砂水理現象であることから、洪水時の河道内流速が破堤口幅と強い関係性があると考えると理解しやすい。

図-13に破堤口幅と洪水継続時間の関係を示す。ばらつきはあるが、洪水継続時間が長くなると破堤口幅が大きくなる傾向がありそうである。河道流量での考えと同様、河道から破堤口に外力が作用する時間に応じて拡幅を続けるためと考えると理解が出来る。

今回は外力として洪水時の最大流量と氾濫危険水位以上の継続時間で評価を行ったが、作用する外力が小さい場合は継続時間が長くても破堤口は拡がりづらいと考えられることから、ハイドログラフ形状も重要な要素になると考えられる。

(3) 破堤口幅と河道内水理量の関係

図-10に破堤口幅と越流水深の関係を示す。越流水深が大きくなると破堤に至る可能性が高まる²⁹⁾など、破堤に至るかの指標として着目されているが、破堤口拡幅段階においては明瞭な関係性は見られない。

図-11に破堤口幅と河道流量（洪水時最大流量、データのない場合は計画高水流量）、図-12に破堤口幅と単位幅河道流量の関係を示す。いずれも流量が大きくなるに従い、破堤口幅が大きくなる傾向が見られる。これは越水から破堤に至った瞬間、これまでは堤防という線で支えられていた洪水のエネルギーが破堤口に向かって一

4. まとめ

本論文では破堤口幅に影響を与える支配的要素を明らかにするための第一歩として、越水破堤事例および破堤実験をもとに、破堤口幅のほか、河道特性、堤体形状や堤体材料、洪水時の水理量などを収集し、破堤口幅との関係性を整理した。

ここまでの整理では破堤口幅に対する影響の客観的な評価が難しいと考えられるため、図-14に破堤口幅と各指標の相関係数を示し、関係性をより明確にした。これより破堤口幅を推定するにあたり川幅のみを指標とする

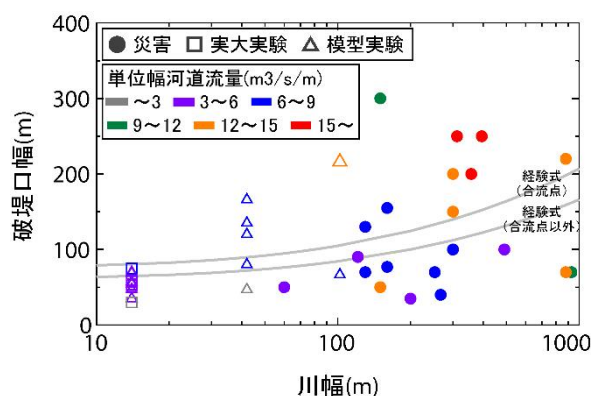


図-15 破堤口幅と川幅の関係 (単位幅河道流量毎)

経験式では十分な評価が難しいこと、また破堤口幅と特に強い関係を持つ指標は河道内水量であることが示された。

例えば図-15は図-2で示した破堤口幅と川幅の関係に加え、単位幅河道流量の区分も示したものである。これより同一の川幅であっても単位幅河道流量が大きいほど破堤口幅が広がる傾向が確認され、破堤口幅は複数の指標を総合的に考慮することで、より精度よく推定できる可能性が示唆された。

今回は破堤口幅と各指標との関係性を整理したが、今後は指標間の相互関係や複合的な要因も考慮し、さらに統計的な手法なども用いた分析が必要であると考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、十勝川千代田実験水路実験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

- 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。
- 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。
- 気候変動を踏まえた水災害対策検討小委員会：気候変動を踏まえた水災害対策のあり方～あらゆる関係者が流域全体で行う持続可能な「流域治水」への転換～，国土交通省，2020。
- 氾濫シミュレーション・マニュアル (案) -シミュレーションの手引き及び新モデルの検証，土木研究所資料，第 3400 号，1996。
- 岩倉浩士，楳田真也：河川堤防の越水破堤・氾濫特性に及ぼす洪水流量の影響評価，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.76, No.2, I 913-I918, 2020。
- 島田友典，山本太郎，白川康平，前田俊一，大串弘哉，高橋賢司，猪子長：越水破堤事例からみる河道特性等が破堤口幅に及ぼす影響，土木学会河川技術論文集，第 30 巻，pp.173-178, 2024。

- 災害教訓の継承に関する専門調査会：災害教訓の継承に関する専門調査会報告書 1947 カスリーン台風，内閣府，2010。
- 昭和 50 年 8 月台風 6 号による石狩川洪水災害および渡島支庁国道 5 号線斜面崩壊災害調査報告，主要災害調査，第 10 巻，防災科学技術センター，1976。
- 大熊孝：堤防の自主決壊による氾濫水の河道還元に関する研究，土木史研究，第 18 号，1998。
- 北海道開発局石狩川開発建設部：石狩川昭和 56 年 8 月洪水報告書，1994。
- 中川一：河川堤防の決壊と対策技術，水工学に関する夏期研修会講義集，土木学会，2014。
- 鬼怒川堤防調査委員会：鬼怒川堤防調査委員会報告書，2016。
- 空知川堤防調査委員会：空知川堤防調査委員会報告書，2016。
- 常呂川堤防調査委員会，常呂川堤防調査委員会報告書，2017。
- 高梁川水系小田川堤防調査委員会，高橋川水系小田川堤防調査委員会報告書，2020。
- 那珂川・久慈川堤防調査委員会，那珂川・久慈川堤防調査委員会報告書，2020。
- 荒川水系越辺川・都幾川堤防調査委員会：荒川水系・都幾川堤防調査委員会報告書，2020。
- 千曲川堤防調査委員会：千曲川堤防調査委員会報告書，2020。
- 阿武隈川堤防調査委員会：阿武隈川堤防調査委員会報告書，2020。
- 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，土木研究所寒地土木研究所，2012。
- 島田友典，横山洋，前田俊一，矢部浩規，桑村貴志：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，土木学会河川技術論文集，第 26 巻，pp.491-496, 2020。
- 島田友典，渡邊康玄，前田俊一，大串弘哉，長谷川武春，猪子長：堤防断面形状および堤体材料が破堤拡幅進行過程に与える影響，土木学会河川技術論文集，第 29 巻，pp.145-150, 2023。
- 島田友典，渡邊康玄，横山博，米元光明：河道横断面形状の相違が破堤現象に与える影響，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.74, No.5, I 1423-1428, 2017。
- 神原柚乃，渡邊康玄，島田友典，大串弘哉：堤防断面形状の相違による破堤特性に関する越水破堤実験，土木学会全国大会年次学術講演会，第 78 回 II-138, 2023。
- 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 巻，pp.197-202, 2024。
- 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 巻，pp.523-528, 2019。
- 坂野章：樹林帯による破堤後の減災効果に関する検討，国土技術政策総合研究所，河川研究部河川研究室資料，2002。
- 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。
- 藤田光一：現代河川工学-基本と展開，技報堂出版，2023。