

特集

越水に対する粘り強い堤防を実現する技術 －自立型構造を例に－

高橋章浩¹・藤澤和謙²・持田祐輔³

Technology for Realising Resilient Levees against Overtopping: With the Example of Partially Self-Supporting Structures

Akihiro TAKAHASHI¹, Kazunori FUJISAWA² and Yusuke MOCHIDA³

Abstract

River levees have been constructed and maintained to prevent floodwater from flowing onto protected land unless the water level exceeds the predetermined high-water level. Now, the government has changed its policy and is attempting to make the levees resilient enough against overtopping, thereby prolonging the time it takes for the levee to breach. One method to realise this is to create a self-supporting structure in the core of the levees using double steel sheet pile walls. To understand the resistant mechanisms of such levees, a series of physical model tests on reinforced levees subjected to overtopping is performed by varying the steel sheet pile specifications. An attempt is also made to simulate the erosion process of the levees under overtopping conditions through finite element analysis.

キーワード：河川堤防，洪水，越水，侵食，鋼矢板

Key words: river levees, floods, overtopping, erosion, steel sheet piles

1. はじめに

水災害の防止・軽減を目的に、河道の掘削や堤防の拡幅、洪水調節施設の整備等の河川整備が進み、洪水被害は以前と比べると大幅に減少している。一方、近年の降雨の激甚化・集中化により治水施設の能力を大きく超える洪水も多発している。国土交通省社会資本整備審議会による「気候変動

を踏まえた水災害対策のあり方について」に関する2020年7月の答申¹⁾を踏まえ、頻発・激甚化する水害・土砂災害等に対し、防災・減災が主流となる社会を目指した「流域治水」の考え方が示され、流域のあらゆる関係者で水災害対策を推進することとなった²⁾。流域治水の三要素は(1)氾濫をできるだけ防ぐ、減らす対策、(2)被害対象を

¹ 東京科学大学環境・社会理工学院
School of Environment and Society, Institute of Science
Tokyo

² 京都大学大学院農学研究科
Graduate School of Agriculture, Kyoto University

³ 日本製鉄技術開発本部
R&D Laboratories, Nippon Steel Corporation

減少させるための対策、(3)被害の軽減、早期復旧・復興のための対策であり、一つ目の要素に含まれる氾濫が発生したとしても氾濫水を減らす取り組みでは、越水した場合でも決壊しにくい「粘り強い堤防」を目指した堤防の強化が速やかに実施すべき施策として挙げられている。本報では、越水に対する堤防強化の現状について紹介するとともに、筆者らが取り組んだ自立型構造による堤防強化に関する研究事例を紹介する。

2. これまでの堤防強化の取り組み

河川堤防は盛土により築造することが原則となっている³⁾。河道掘削や堤防の増築・補修等を繰り返すことで河川の高水流量を確保してきたこれまでの経緯を踏まえると、堤防を土で構築する(土堤とする)ことに合理性はある、これが綿々と続けられてきた。一方土堤には、水の侵入や越水時の表面侵食が発生しやすいという特徴がある。2019年台風第19号(以下、令和元年東日本台風)では、全国142か所で主として越水による堤防決壊が発生し、水害被害額が1兆8800億円にも及んでいること⁴⁾等を考えると、少なくとも現状で問題がないとは言えない。

もちろん無策で現在に至っているわけではなく、さまざまな堤防強化の取り組みが行われている。河川水等が堤防内や基礎地盤に浸透することで発生する堤防の不安定化に対しては、2000年代に質的整備詳細点検が行われ、それに基づく川裏側のり尻部へのドレーン工(主としてふとんかごの設置)が行われている。越水による決壊に対しては、1980年代後半から1990年代にアーマーレビーやフロンティア堤防といった表面強化堤防の試験整備が行われた。その後間を空けて、2015年9月の鬼怒川の堤防決壊を契機とする危機管理型ハード対策⁵⁾として、堤防天端のアスファルト舗装と川裏側のり尻へのコンクリートブロック設置による越水時侵食起点部の強化等が行われており、越水に対する堤防表面の耐侵食性向上が進められている。

3. 最近の堤防強化に向けた動き

多くの堤防決壊が発生した令和元年東日本台風

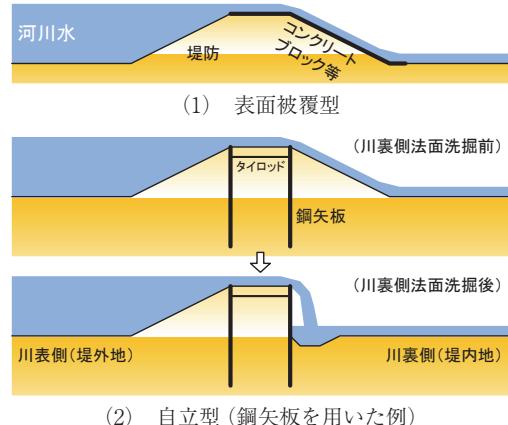


図1 堤防強化の例(越水時の堤防断面図)

の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会では、前節で示した危機管理型ハード対策が有効であった事例を紹介しつつ、「粘り強い堤防」に必要となる性能についての技術検討が行われ、そのような堤防技術開発の必要性を示している⁶⁾。ここで言う粘り強い堤防は、決壊するまでの時間を少しでも長くすることで減災効果を発揮するものである。すなわち、堤防には越水に対する多少の粘りは期待するが、抜本的改善は難しいとの想定が前提にある。

2021年度の国土交通省の河川砂防技術研究開発においては、上記に関連する課題が設定され、河川技術・流域管理分野の指定型課題は「越水に対する河川堤防の強化構造の検討に資する評価技術の開発」であった。対象強化構造は、これまでにある程度の実績のある国土技術政策総合研究所等でも研究が進められてきた堤防表面を保護する表面被覆型と、これまでになかった形式である越水により部分的に堤防が壊れてもコア部が存続することにより堤高を保持できる自立型の二つであり(図1)，筆者らは後者に関連する研究に取り組んだ。

2023年には、越水に対して「粘り強い河川堤防に関する技術」の公募⁷⁾があった。技術開発目標(評価の目安)として、「越流水深30cmの外力に対して、越流時間3時間」が示され、その間は越水に対して堤防に求められる性能を維持する構造

(堤防高を維持する機能)が求められた。応募された技術の中から、耐越水性能を有し、少なくとも計画高水位以下であればその性能が土堤と同等以上と判断された表面被覆型4技術が技術比較表の形で公表された⁸⁾。なお、筆者らの研究に関連する自立型1技術については、技術比較表への掲載は見送られたものの、その耐越水性能についてはある一定の確認がなされ^{9,10)}、河川管理施設等構造令適用外の区間での試験等を通じて、技術開発を継続することとなった。以下では、著者らの実施した研究の一部について簡単に紹介する。

4. 鋼矢板二重壁の耐越水性能に関する模型実験

自立型構造を実現する形式・材料には様々なものが想定されるが、筆者らの研究では鋼矢板二重壁工法を取り上げた。この工法は2列の鋼矢板を壁状に打設して頭部をタイロッドで結合したもので、鋼矢板壁間に土で満たされており、鋼矢板と土でコア部を形成する。この工法には、河川堤防を再構築する際に計画高水位以下の河川水が河川外に流出することを防ぐための仮締切構造¹¹⁾としての実績や、水門建設のための仮締切が東日本大震災時に9mを超える津波を受けても残存していた¹²⁾という事実はあるが、比較的長時間の越水下での振る舞いは不明であったことから、実験的に自立型構造の越水時挙動を調べた^{13,14)}。

堤高6m、天端幅6mの堤防を1/15の縮尺でモデル化して越水実験を行った。ここでは、越水による決壊の危険性がより高い砂質土で構成される堤防を対象とした。時間の相似則にはシールズ則を適用し、上記の評価の目安に相当する越水は、模型スケールにおいて、越流水深22mm(実物換算0.33m)、越流時間19分(実物換算3時間)として実験を行った。実験では、基本ケース(EL500t6)の条件は河川堤防の鋼矢板二重式仮締切設計マニュアル¹¹⁾を基に設定し、コア部の安定性を左右する矢板の根入れ長や鋼矢板の土に対する相対剛性を変化させた。

図2は基本ケース(EL500t6)における鋼矢板二重壁および川裏のり面の各段階の変状を示して



(1) 川裏側のり面流失時



(2) 越水時間3時間相当時

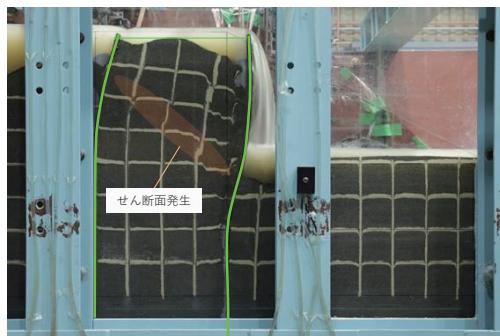
図2 越水に伴う堤防変状(EL500t6)

いる。川表側で天端付近まで水位が上昇した越水直前の状態では川裏のり面を含め堤防に変状は発生しないが、越水開始後は川裏のり面が侵食され(図2(1))、その後越流水は滝つぼのように川裏側基盤部を掘りこむ洗掘現象が生じる。鋼矢板の根入れ長や剛性が十分な場合は、越水に対する堤防の性能を確認する目安の時間である越水時間3時間相当時においても、鋼矢板二重壁にはほとんど変形は見られない(図2(2))。

一方、鋼矢板の根入れ長や剛性が不足する場合は、鋼矢板二重壁に傾斜や変形が発生する。例として、根入れ長が基本ケースの60%のケース(EL300t6)や、根入れ長は基本ケースの2倍だが鋼矢板厚が基本ケースの27%のケース(EL1000t1.6)での越水時間3時間相当時の堤防変状を図3に示す。鋼矢板の根入れ長が極端に不足して川裏側鋼矢板の根入れ部下端が川裏側へ移動するハの字破壊が生じてしまうような場合や、鋼矢板の剛性が



(1) 根入れが小さい場合 (EL300t6)



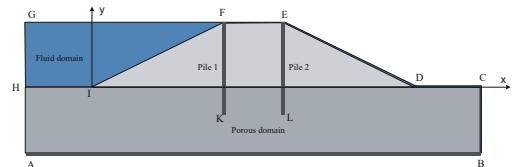
(2) 鋼矢板剛性が小さい場合 (EL1000t1.6)

図3 越水時間3時間相当時の堤防変状

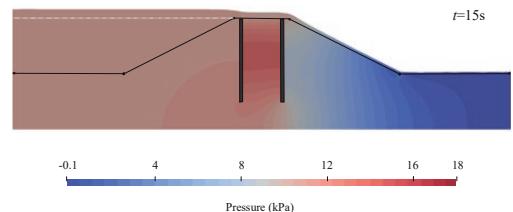
極端に不足していて塑性変形してしまうような場合を除けば、この図に示すように、コア部のせん断変形や若干の天端沈下は発生するものの、越水時間3時間相当時においても堤防高は概ね保持することができ、求められる機能が発揮できることが確認された。

5. 越水による河川堤防の堤体侵食に関する数値解析

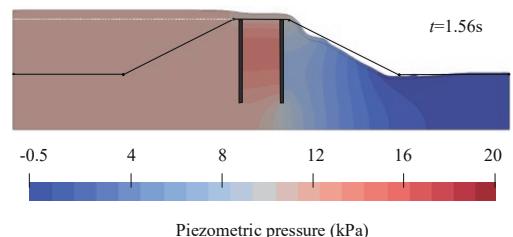
前節で示したような非粘着性土（砂質土）で構成される堤防では、堤体表面の越流水の流れだけでなく、堤体内に浸透する水の流れ（浸透流）が堤防全体に与える影響を考える必要があり、特に堤体内の間隙水圧分布と侵食・洗掘による堤体形状の変化は、その安定性に重要な影響を与える。そのため、これら二つの流れの同時計算を可能にする Darcy-Brinkman 式を支配方程式に採用し、越流時に堤防を取り巻く流れの状況を把握し、堤



(1) 数値計算対象の堤防形状



(2) 越水時の水面形とピエゾ圧分布



(3) 侵食時の水面・堤体形状、ピエゾ圧分布

図4 堤体の侵食解析例

体内的間隙水圧分布等を把握するだけでなく、堤体が受ける侵食・洗掘を考慮できる数値計算を試みた¹⁵⁾。数値解法には、自由水面の変動や侵食を受ける堤体形状の変化による計算領域の形状変化に追従するため、Space-Time 有限要素法を利用し、また安定化を施した乱流計算も可能とするため変分マルチスケール法を適用した。

解析対象を図4(1)に示す。ここでは計算負荷の削減のため、堤高1mの小型堤防を想定した。越水後の飽和した堤防を侵食解析の対象とし、初期条件を与えるため、まず越水時の堤体上を流れる表面流（越流水の流れ）と堤体内的浸透流の流況を計算した。図4(2)に計算開始15秒後の水面形とピエゾ圧（位置水頭と圧力水頭の和に水の単位体積重量を乗じたもの）の分布を示す。水面形は表面流の自由水面の形状であり、15秒後に安定してほぼ定常状態となった。堤体上の越流水と堤体内的浸透水の両方において連続的にピエゾ圧が

分布しており、表面流の流れとともに堤体内的間隙水圧分布を知ることができる。また、越流水と浸透水の両方の流れも計算結果として得られる。

侵食計算は、上記の流れの初期条件の下で、堤体表面近傍の流速から侵食速度に応じて堤体形状を変化させることで行った。この計算にあたっては、侵食による堤体表面の形状変化と表面流の自由水面形の変化に応じた計算領域全体の有限要素メッシュの移動が必要となる。侵食時の自由水面の形状、堤体形状、ピエゾ圧の分布(1.56秒後)を図4(3)に示す。表面流の流速が比較的大きくなる法肩と法尻において、侵食が早く進行することが見てとれ、この侵食の様子は実際の現象とも一致するものである。このとき表面流の自由水面は、侵食による堤体表面の変化に応じて波打つようになる。この解析手法では、このような複雑な計算領域の変化も追従できるが、領域の変形が大きくなるとメッシュ品質の低下が発生する。実際に、図4(3)に示す計算結果を得るために(メッシュの品質を維持するため)数回のリメッシュを行う必要があり、堤体形状と流れの変化が大きい場合、侵食計算に伴う計算負荷は小さくない。

6.まとめ

本報では、越水に対する堤防強化の現状について紹介するとともに、筆者らが取り組んだ鋼矢板二重壁工法を適用して自立型構造を構築することによる越水に対する堤防強化に関する研究事例を紹介した。模型実験を通じて、鋼矢板二重壁を堤防中央に構築することで、越水に対する粘り強い河川堤防に関する技術の開発目標である越流水深30 cm の外力に対して、越流時間3時間に堤防に求められる性能を維持する(堤防高を維持する)ことが可能であることを示し、想定される破壊モードや鋼矢板二重壁の限界状態についても明らかにすることができた。また、堤体の侵食過程を再現できる数値解析の概要と計算例についても示した。今回示した数値解析では、のり面の崩壊過程の表現に課題が残されていることから、今後は、適切な安定化と表層のすべりを表現できる構成式

を導入した堤防の侵食・変形連成解析が求められると考えている。

謝辞

本研究の一部は、国土交通省河川砂防技術研究開発公募での研究であり、国土技術政策総合研究所の令和3・4年度委託研究「一部自立型構造を有する河川堤防の増水～越水～引水時性能評価に関する技術研究開発」として実施した。ここに記して深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省 社会資本整備審議会 答申：気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について、2020.
- 2) 国土交通省 水管理・国土保全局：流域治水の推進、<https://www.mlit.go.jp/river/kasen/suisin/>、閲覧日2025年4月25日。
- 3) 河川管理施設等構造令 第19条(昭和51年政令第199号)、1976.
- 4) 国土交通省 水管理・国土保全局：令和元年水害統計調査、2021.
- 5) 国土交通省 社会資本整備審議会 答申：大規模氾濫に対する減災のための治水対策のあり方について、2015.
- 6) 令和元年台風第十九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.
- 7) 一般財団法人国土技術研究センター：越水に対して「粘り強い河川堤防に関する技術」(技術公募)、<https://www.jice.or.jp/nebarizuyoi/>、閲覧日2025年4月25日。
- 8) 国土交通省 水管理・国土保全局：河川堤防の強化に関する取り組み、https://www.mlit.go.jp/river/kasen/teibou_kyouka/、閲覧日2025年4月25日。
- 9) 一般財団法人国土技術研究センター：越水に対して「粘り強い河川堤防に関する技術」技術公募の評価結果、https://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/nebarizuyoi/20240619_kekka.pdf、閲覧日2025年4月25日。
- 10) 河野努・三好朋宏・福島雅紀・瀬崎智之：実大模型実験による二重式鋼矢板構造を有する堤防の越水破壊挙動の検討、河川技術論文集、Vol. 30, pp. 167-172, 2024.
- 11) 国土技術研究センター：鋼矢板二重式仮締切設

- 計マニュアル, 2001.
- 12) 鋼管杭・鋼矢板技術協会：東日本大震災1次調査報告書, 2011.
- 13) 持田祐輔・藤澤和謙・高橋章浩：越水に対する粘り強い河川堤防を実現する鋼矢板構造の技術開発, 基礎工, Vol. 51, No. 10, pp. 35-38, 2023.
- 14) 持田祐輔・石濱吉郎・高橋章浩：鋼矢板二重壁により補強された河川堤防の越水時における限界状態に関する研究, 地盤工学ジャーナル, Vol. 19, No. 4, pp. 357-371, 2024.
- 15) 藤澤和謙・Sharma Vikas：越水による河川堤防の堤体侵食に関する数値解析, 地盤工学会誌, Vol. 73, No. 3, pp. 47-52, 2025.

(投稿受理：2025年5月1日)

要　旨

従前河川堤防は、越水を考慮せず、計画高水位の河川水を安全に流下させることを目標に整備が行われてきた。現在、政府は方針を転換し、堤防を越水に対して「粘り強い」構造とし、堤防が決壊するまでの時間を延ばすことを進めようとしている。粘り強い構造を実現する方法の一つとして、鋼矢板二重壁を堤防のコア部に構築し、越水時に部分的に堤防が侵食されてもコア部が自立して存続することにより堤高を保持できるようにするというものがある。このような自立型構造を有する堤防の越水に対する抵抗メカニズムを明らかにするため、一連の模型実験を実施した。また、有限要素解析による越水時の堤防の侵食過程の再現も試みた。本報ではこれらの概要について紹介する。