

粘り強い河川堤防の技術開発

福島雅紀・三好朋宏・西嶋貴彦

1. はじめに

平成27年関東・東北豪雨による常総水害を受け、“施設の能力には限界があり、施設では防ぎきれない大洪水は必ず発生する”との基本認識の下、こうした大洪水に備える「水防災意識社会再構築ビジョン」を国土交通省は策定した¹⁾。その下で、氾濫リスクが高いにも関わらず、当面の間、上下流バランス等の観点から河道や堤防の整備に至らない区間について、決壊までの時間を少しでも引き延ばすよう、堤防構造を工夫する対策を導入する必要があった。そのため、国土技術政策総合研究所河川研究室は、堤防天端のアスファルト舗装や裏法尻のブロック被覆によって堤体の侵食や崩壊の進行を遅らせる危機管理型ハード対策について、水理模型実験等によって効果を確認し、構造検討や設計のための技術的資料²⁾を作成した。

令和元年東日本台風による甚大な被害を受けて設置した技術検討会³⁾では、越水した場合でも決壊しにくい「粘り強い河川堤防」を目指すなどの緊急的・短期的な堤防強化方策の方向性が示された。それらを踏まえ、河川研究室は、危機管理型ハード対策の概念を発展的に踏襲する「粘り強い河川堤防」の技術開発をさらに推し進めている。本報では、堤防に求められる機能と堤防強化構造を整理した上で、主に表面被覆型の堤防強化構造を検討する理由を述べる。次に、大型堤防模型を用いた越水実験の必要性を述べた後に、実験結果を紹介し、今後の展開を述べる。

2. 堤防に求められる機能と堤防強化構造

2.1 堤防に求められる機能

河川管理施設等構造令に基づけば、堤防とは、流水が堤内地に流出することを防止するために設ける施設であり、護岸、水制その他これらに類する施設と一体として、計画高水位以下の水位の流水の通常的作用に対して安全な構造とする必要がある。具体的には、表-1に示す安全性照査項目、

表-1 堤防に求められる機能

安全性照査項目	<ul style="list-style-type: none"> ・ 常時の自重による沈下及びすべり破壊等に対する安全性（常時の健全性） ・ 計画高水位（計画高潮位）以下の水位の流水の通常的作用による侵食及び浸透並びに降雨による浸透に対する安全性（耐侵食性能及び耐浸透性能） ・ 地震時に対する安全性（耐震性能） ・ 波浪等に対する安全性（波浪等に対する安全性）
設計に反映すべき事項	<ul style="list-style-type: none"> ・ 不同沈下に対する修復の容易性 ・ 堤体と基礎地盤との一体性及びなじみ ・ 嵩上げ及び拡幅等の機能増強の容易性 ・ 損傷した場合の復旧の容易性 ・ 基礎地盤及び堤体の構造及び性状にかかる調査精度に起因する不確実性 ・ 基礎地盤及び堤体の不均質性に起因する不確実性
設計に於て考慮すべき事項	<ul style="list-style-type: none"> ・ 環境及び景観との調和 ・ 構造物の耐久性 ・ 維持管理の容易性 ・ 施工性 ・ 事業実施による地域への影響 ・ 経済性 ・ 公衆の利用

設計に反映すべき事項、設計にあたって留意すべき事項が堤防に求められる機能（以下「堤防機能」という。）として挙げられる⁴⁾。

2.2 粘り強い河川堤防の構造

粘り強い河川堤防は、表-1の堤防機能に越水に対する性能、例えば“越流水深30cmの越水が3時間継続した場合でも堤防天端高が維持される性能”を付加するものである。治水の大原則は河川水位を下げることであり越水の頻度が少ないことを考えると、越水に対する性能を付加した場合でも、耐浸透性能などの既存の堤防の性能を毀損してはいけない。

具体的な構造は、図-1 (a)、(b)の2タイプが想定されている⁵⁾。表面被覆型は、計画高水位以下の水位の流水の通常的作用に対する堤防機能は土堤により確保し、土堤表面にシートやブロックを設置することにより越水に対する性能を発揮する。自立型は、両側の盛土の部分がなくとも自立部が自立する構造で、計画高水位以下の水位の流水の通常的作用に対する堤防機能及び越水に対する性能を発揮する。なお、その他の新たな構造についても検討していく。

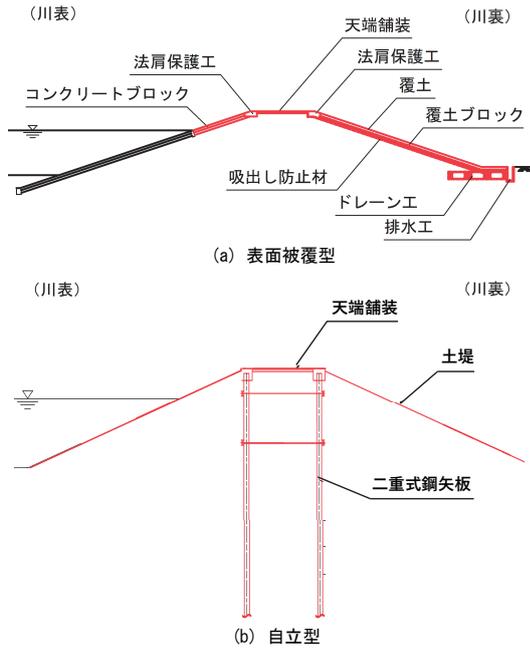


図-1 堤防強化構造のイメージ（表面被覆型、自立型）

2.3 本報で対象とする堤防強化構造

表面被覆型は既存の堤防の性能をほとんど変化させないと考えられ、河川研究室は表面被覆型の技術開発を長年進めてきた⁶⁾など。特に、堤体（土堤）は大災害で被災するたびに嵩上げや拡幅等の復旧が行われ、出水を経験することで変状の有無が確認され、堤体土の不均質性等の不確実性は残るものの、耐浸透性能について信頼性の高い構造物に強化されてきた構造物と言える。このため、既存の堤防が持つ耐浸透性能を毀損することがなく、越水に対する性能を付加するには、表面被覆型が効率的である。なお、覆土をした場合の維持管理の容易性は十分には確認されていないため、パイロット施工箇所⁵⁾などにおいて検証する必要がある。

自立型については、表-1の設計に反映すべき事項に課題が残されており、越水に対する性能に加え、堤体と基礎地盤との一体性及びなじみの評価方法などを開発する必要がある。そこで、河川砂防技術開発制度を活用し、鋼製矢板やPC矢板を用いた堤防強化構造について、産学と連携して技術開発を進めているところである。本報では紙面の関係から自立型については割愛する。詳細は河川砂防技術開発制度の報告書⁷⁾としてとりまとめられる予定である。以下、本報で対象とする主な堤防強化構造は表面被覆型とする。

3. 大型堤防模型を用いた越水実験

3.1 大型堤防模型の必要性

越水に対する性能を評価する手法は確立されていないため、堤防模型を製作し実験によって越水に対する性能を確認する必要がある。確認にあたっては、決壊に至るまでのプロセスや時間を把握し、施工や維持管理にあたっての留意点を見出すことが重要である。

堤防模型の製作にあたり、縮小模型とした場合、越水外力である越流水深が模型縮尺に応じて小さくなり、裏法面に作用する越流水のせん断力も小さくなるのに対して、土の強度や吸出防止シートの効果などを模型縮尺に合わせて変更することは困難である。その結果、実際の堤防に比べて相対的に壊れにくい、もしくは壊れやすい堤防となり、越水に対する性能を的確に評価できない。既往の実験結果等⁶⁾などを参考にすると、堤防高2mの実物大の堤防模型を用いることで、越流水の流れが十分に加速され、堤防法尻付近で堤防表面の耐侵食力を確認できると考えられる。本検討では、高さ4mの堤防を設置可能な大規模堤防模型実験水路（側壁高6m）を用い、十分に加速された越流水が裏法面に作用し、耐侵食力を確認できる区間を確保した。

3.2 表面被覆材の選定

表面被覆型の堤防強化構造に関する既往の検討⁶⁾などでは、吸出防止シートとブロック、遮水シート、吸出防止シート、改良土などが表面被覆材として用いられてきた。大型堤防模型実験の結果、ある条件の下では一定の効果が発揮されるが、強化対策の効果に幅や不確実性があることも確認されている。今回の検討では、既存の堤防の性能、特に堤体内に侵入した雨水や河川水が排水されるように吸出防止シートを用いることを基本とし、越水実験を行った。次節では、吸出防止シートをブロックで押さえた構造を対象とした越水実験の結果を紹介する。

3.3 越水実験結果

図-2は吸出防止シートをブロックで押さえる構造の模式図である。堤防高4m、裏法勾配3割の堤防の裏法部を吸出防止シートと連節ブロックによって被覆した構造である。築堤にあたっては、図-3の砂質土を用いて、締固め度が90%になるよ

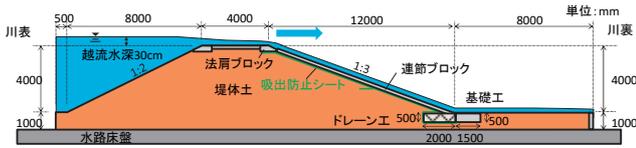


図-2 吸出防止シートを連節ブロックで押さえる構造

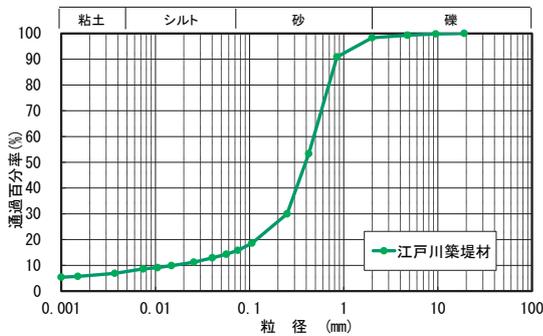


図-3 堤体土の粒度分布

うに施工管理を行いつつ、通常の堤防と同様に厚さ30cm毎に締固めた。築堤後の堤体土の引張破壊応力は 0.9kN/m^2 程度であり、一般的な耐侵食力を持つ堤体であることを確認した。

越流水が裏法面に作用すると、裏法面には流速 4m/s 以上の高流速が作用し、堤体土表面を侵食する。本構造では、ブロックと吸出防止シートによって堤体土に作用する流速を低減させ、裏法面の侵食を抑制するものである。したがって、越流水が裏法面に作用した時のブロックの安定性を確保することが重要である。そのため、以下の点に留意した。吸出防止シートの上流端部は天端舗装の下や法面部に差し込み、ブロックが剥がれ越流水が直接作用した場合でも抜け落ちないように差し込み長を確保した⁸⁾。また吸出防止シートの幅は2mであるため、堤防長手方向には15cm重ねて設置した。水路の幅が5mであるため、堤防模型には2箇所を重ね部が存在する。法肩部には法肩ブロックを配置し、法肩部から裏法部のブロックがめくれ上がるのを防止した。法面部は連節ブロックで被覆し、連節材として亜鉛・アルミ合金メッキ鋼線(φ8mm)を用いた。越流水によってブロックが法面方向に滑動した場合でも基礎工によって支持され、連節材の高い曲げ剛性によって折れ曲がりが生じにくい構造とした。基礎工は、連節ブロックの荷重を支持し、越流水が作用した場合でも転動や滑動しない重量(形状)とした。図-4(a)は裏法部の施工完了後の写真である。

越水実験では、目標とする越流水深30cmに至



(a) 施工完了後の裏法部の状況 (b) 通水後に被覆材を剥がした状況
図-4 施工完了後の裏法部及び通水後の堤体表面の状況



(a) 越流水深20cmで通水した後の裏法部の状況 (b) 滑動し折れ曲がった連節ブロック
図-5 被覆ブロックが折れ曲がった事例

るまで15cm、20cm、25cmと徐々に越流水深を増加させ、越流水に対して連節ブロックが安定することを確認した。次いで、越流水深を30cmに固定し、1時間、2時間と連続通水させた。通水前に3次元レーザースキャナー(Zoller+Frohlich社製 IMAGER 5016)によって、堤体形状を計測し、1時間後、その後の2時間後にも同様な形状計測を行った。その結果、越流水深30cmで3時間継続して越水させた場合でも、ブロックの変状は見られず、吸出防止シート下の堤体土もほとんど侵食されていなかった。図-4(b)が通水後に吸出防止シートを剥がした状況であるが、施工時やシート剥離時に人為的に付いたと思われる窪み(図中の赤枠線内)が数箇所を確認されるのみであった。

図-5は、側壁高4mの実験水路を用いて、堤防高2m、裏法勾配2割の堤防模型を設置し、吸出防止シートと図-4と同型の連節ブロックで被覆し、越水実験を行った結果である。越流水によって連節ブロックが滑動した場合でも、基礎工によって支持され、連節ブロックによる被覆状態が維持される想定であった。しかしながら、この実験では連節材として曲げ剛性の低いワイヤーロープ(φ6mm)を用いていたため、折れ曲がりに対する抵抗がなく、ブロックが滑動した際に基礎工で支

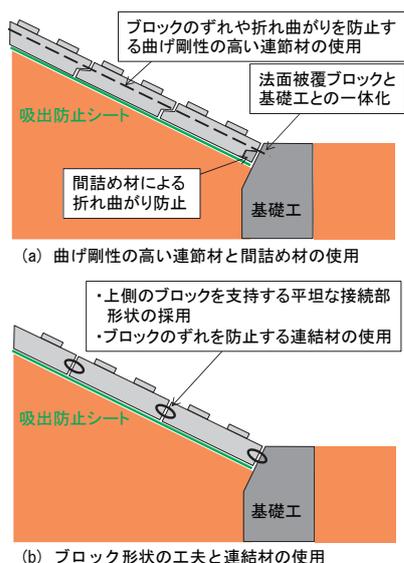


図-6 ブロックの折れ曲がり防止するための構造例

持されたがブロックの接続部で折れ曲がったことが確認された。

本報で紹介した実験は、連節ブロックを用いた実験結果である。図-6には、連結ブロックの場合も含めて、折れ曲がり防止するための構造例を示す。(a)曲げ剛性の高い連節材を用いてブロックの折れ曲がり防止すること、(b)ブロック形状の工夫と連結材による折れ曲がり防止など、ブロックの接続部がずれにくい構造とすることが、吸出防止シートをブロックで押さえる構造の越水に対する性能を維持する上で重要である。

4. 今後の展開

本報では、表面被覆型の堤防強化構造の事例として、吸出防止シートを連節ブロックで押さえた構造を対象とした大型堤防模型実験の概要、そこから得られた構造検討上の留意点を紹介した。

今後、国土交通省では粘り強い河川堤防の技術開発を行うため、越水に対して求める性能等を公募条件で提示し、民間企業等の技術を公募する予定である。河川研究室は、河川堤防の強化に関す

る技術検討会⁵⁾の事務局の一員として、提案された技術の評価に関わり、必要に応じて大規模堤防模型実験による性能の確認を実施する予定である。粘り強い河川堤防の構造が多数提案され、経済的かつ信頼性の高い粘り強い河川堤防が整備されることを期待する。

謝 辞

関東地方整備局河川工事課及び江戸川河川事務所からは築堤に用いる堤体土を提供していただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

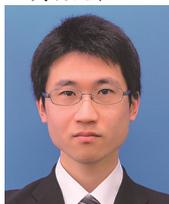
- 1) 国土交通省水管理国土保全局：水防災意識社会再構築ビジョン、2015。
<https://www.mlit.go.jp/river/mizubousaivision/>
- 2) 服部敦、森啓年、笹岡信吾：越水による決壊までの時間を少しでも引き延ばす河川堤防天端・のり尻の構造上の工夫に関する検討、国総研資料、第911号、2016。
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/gijutsu_kentoukai/index.html
- 3) 国土交通省水管理国土保全局：令和元年台風第19号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会、2020。
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/gijutsu_kentoukai/index.html
- 4) 国土交通省：河川砂防技術基準 設計編 第1章 河川構造物の設計 第2節 堤防、2019。
https://www.mlit.go.jp/river/shishin_guideline/gijutsu/gijutsukijunn/sekkei/pdf/1-2_g.pdf
- 5) 国土交通省水管理国土保全局：河川堤防の強化に関する技術検討会、2022。
https://www.mlit.go.jp/river/shinngikai_blog/teibou_kentoukai/dai01kai/
- 6) 須賀堯三、橋本宏、石川忠晴、藤田光一、葛西敏彦、加藤善明：越水堤防調査最終報告書・解説編、土木技術資料、第2074号、1984。
- 7) 河川砂防技術開発制度 令和3年度採択テーマ。
<https://www.mlit.go.jp/river/gijutsu/kasenryuui/theme.html>
- 8) 三好朋宏、笹岡信吾、森本洋一、福島雅紀：越水に対する堤防強化におけるシートの固定方法に関する検討、河川技術論文集、第27巻、pp.187~192、2021。

福島雅紀



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室長、博士(工学)
Dr. FUKUSHIMA Masaki

三好朋宏



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室主任研究官
MIYOSHI Tomohiro

西嶋貴彦



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室交流研究員
NISHIJIMA Takahiko