

激甚化する水害へ向けた堤防の浸透強化に係る取組み

石原雅規・尾西恭亮・佐々木哲也・宮武裕昭

1. はじめに

近年、大規模な水害が毎年のように発生しており、浸水による被害を軽減するための堤防強化が喫緊の課題となっている。堤防は膨大な延長を有し局所的な弱点が堤防全体の安全性を決定するため、弱点箇所を効率的に検出・評価し、的確な対策工を行う必要がある。ここでは、近年の堤防の被災のうち、浸透による被災事例を紹介する。併せて、効率的に弱点箇所を把握するための調査技術としての物理探査、変状の進行性を踏まえた浸透に対する安全性評価技術、より合理的な対策工法の開発に向けた取組みを紹介する。これらの取組みは、第5次社会資本整備重点計画の重点目標1「防災・減災が主流となる社会の実現」に資するものである。

2. 浸透破壊が発生した被災事例と特徴

最近10年程度で発生した浸透による被災事例から、すべり、基盤漏水、堤体漏水の3つの破壊形態の代表事例を紹介する。

2.1 小田川におけるすべり

平成30年7月豪雨（西日本豪雨）により、高梁川支川小田川の直轄管理区間では2箇所の決壊が発生した。これらの決壊の原因は、越水によるものと結論付けられているが、決壊箇所から少し離れた堤防では、浸透によるすべりや漏水・噴砂が発生していた。

左岸4.2k付近のすべりの被災直後の状況を写真

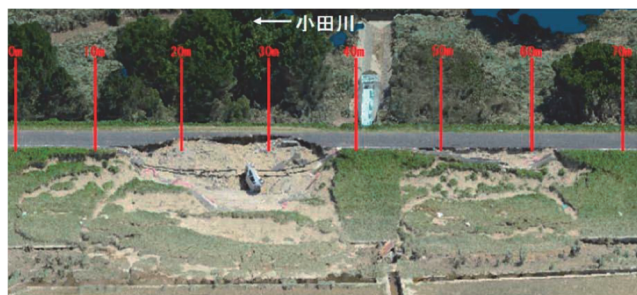


写真-1 小田川左岸4.2k付近のすべり（中国地整提供）

-1に示す。一般に、堤防で発生するすべりでは、その変状の範囲は片側の法面内に収まる場合が多いが、本事例では天端舗装の大部分が崩壊しており、極めて深刻な状態にあったと考えられる。

すべりの発生を目撃した者が確認されておらず、すべりの進行過程は明らかではないが、崩壊範囲の植生が複数に分割されている状況から、法尻付近の比較的小規模なすべりが発生した後、天端に向かってすべりが拡大したことが推測される。

同じ出水では、小田川右岸0.6k付近でも大規模なすべりが発生していた。これらのすべりが発生した箇所と決壊箇所（すべりは確認されていない）で行った開削調査によると、すべりが発生した箇所の方が、土層構成が複雑であった²⁾。

2.2 矢部川における基盤漏水

平成24年7月の豪雨により矢部川中下流域でほぼ全川にわたり計画高水位を超える出水となり、右岸7.3k付近で決壊が発生した³⁾。水防団は、法尻付近から水が噴き出し始め、その後短時間で堤防が崩れ、一気に決壊に至ったと証言している。

決壊原因は、堤体直下に分布していた砂層であると考えられており、その厚さを詳細に調べた結果、図-1に示す分布図が得られている。砂層は堤内地側に入り込んで行き止まりとなっていたため、砂層の水圧が上昇しやすかったことが影響したと

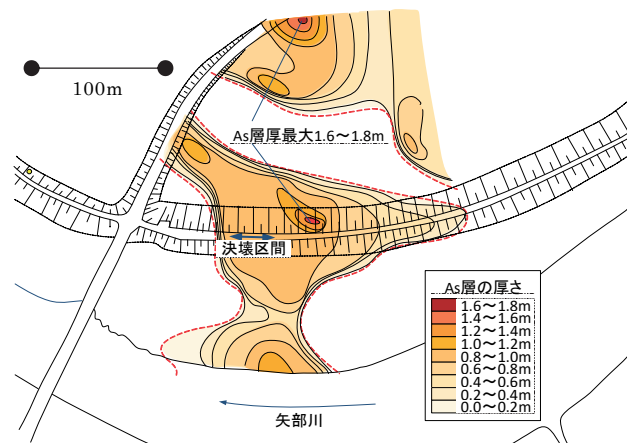


図-1 矢部川右岸7.3k付近の砂層厚さの分布³⁾

考えられている。また、この砂層は堤防直下で縦断方向に100m程度（厚さ1m以上）の延長しかなかったことも特徴である。

2.3 最上川における堤体漏水

令和2年7月豪雨により最上川では多数の浸透被災が確認されている。最上川右岸81.5kはこのような被災箇所の1つで、裏法尻付近からの漏水・噴砂（写真-2）と小段上部の裏法面の陥没（写真-3）、亀裂が確認された。

部分開削調査の結果、噴砂は堤体由来であることが分かり、堤体土が吸い出されたために法面に陥没や発生したと考えられる⁴⁾。

また、本事例で漏水・噴砂が確認された区間は、前後区間と異なる基礎地盤構造を有し、物理探査の結果から堤体材料も異なると推測されている。

2.4 被災事例のまとめ

紹介した3事例を横断的にまとめる。

(1) 土質の不均質性、土質・土質構造の変化

被災箇所では、不均質な土質であったり、土質や土質構造が前後区間と異なったりすることが多い。被災の要因となった土質が局所的にしか存在しない場合も多いため、ボーリング調査でこれを見つけることは難しい。このため、サウンディング調査や連続的にデータが取得できる物理探査が有効となる場合がある。被災箇所の特徴が分かれば、類似の被災が生じやすい箇所（弱点箇所）を絞り込むことができ、効率的な対策が可能となる。



写真-2 最上川右岸81.5k付近の法尻で確認された噴砂による砂の堆積



写真-3 最上川右岸81.5k付近の法面陥没

(2) 浸透破壊の進行性

模型実験でも同様であるが、被災事例でも小さなすべりから徐々にすべりが拡大し、危険な状態となる。基盤漏水等でも同様で、短時間であったとしても一定時間噴砂が継続することによって、パイピングが発達し、陥没、決壊に至る。堤防の本来の耐浸透性能を考える上では、このような浸透破壊の進行性を考慮することが不可欠となる。

(3) 被災後調査の重要性

被災メカニズムは復旧工法を検討する上で重要な情報である。これを把握するためには、被災状況を的確に記録した上で、ボーリング調査だけでなく、サウンディングや物理探査、開削調査などを併用し、土質構造の連続性を把握することが有効である。前述の3事例は何れも開削調査等も活用し、被災メカニズムを解明できた事例である。

3. 浸透破壊のメカニズム

前述のような被災事例も含め、代表的な浸透破壊の進行を図-2にまとめた。各被災箇所の被災状況や調査結果を踏まえ、変状の進行をたどることによって、浸透破壊メカニズムを明らかにすることができる。対策を検討する際にも有効である。基礎地盤の水圧が上昇した結果、漏水・噴砂だけでなく、すべりも発生した事例が複数確認されている。このため、下向きの矢印だけでなく、横向きの矢印にも注意し、変状の進行を想定・確認しておくことが重要である。

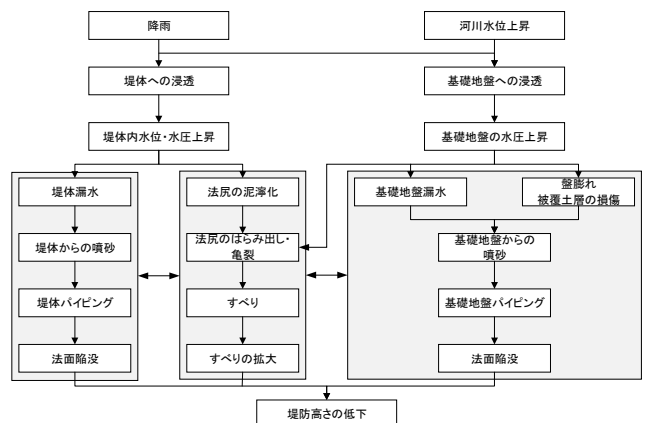


図-2 河川堤防の代表的な出水時の浸透破壊の進行

4. 浸透破壊対策のための研究

4.1 効率的に弱点箇所を把握するための調査技術（物理探査）

効率的に弱点箇所を把握するためには、紹介し

た被災事例から明らかなように土質の不均質性、土質・土質構造の変化を把握することが不可欠であるが、これはボーリング等による点の情報だけでは把握しがたく、高密度または連続して調査可能な手法の活用が有効である。物理探査はそのような手法の1つである。

図-3に、川裏法尻で漏水が認められた堤防での物理探査による調査事例を示す。川表小段、天端、川裏小段の3カ所で堤防縦断方向に電気探査を実施した結果となる。電気探査は一定間隔で電極棒を地面に設置し、地盤の電気の流れやすさを調べる手法である。一般的に単位体積あたりの電気の流れにくさの分布（電気比抵抗分布）が得られる。地下水位より上位にある堤体および堆積平野の浅部地盤では、多少の水分率の相違に因らず、電気比抵抗が低く導電性が高い領域は粘性土によるものと考えてよい。

すなわち、図-3では、40m～110mの区間に粘性土が存在していることがわかる。これは、天端道路の舗装が修復されている区間と一致している。一方、川表の小段は、旧堤体の天端に相当し、旧堤は切れ目なく粘性土で築堤されていることがわかる。この結果から、漏水は河川水の浸透ではなく、雨水が堤体内を集中的に流れることによって発生したものと推測され、開削調査の結果とも整合していた。

物理探査は適切に使用すれば効率よく弱点箇所の把握に繋がる情報が得られる有益な道具である。適切にという意味は、まず、明らかにしたい構造に狙いを定め、物理探査の手法を選定し、測線を適切に設定するなどの調査計画を立案することである。次に、物理探査から得られる一次情報は、電気比抵抗やS波速度などの物性値であり、土質分類や透水係数ではないことに留意が必要である。

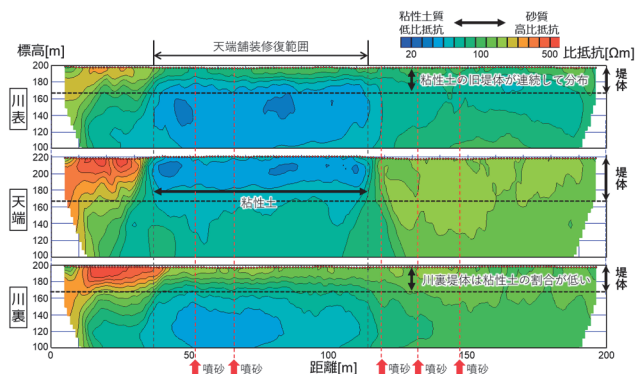


図-3 堤防における電気探査調査例

このため、物理探査の記録だけでなく、ボーリングや過去の土地利用分布などの情報を活用することにより、推定精度が向上する。また、探査手法や地盤の条件によって、得意不得意があり、参照情報と整合しない場合があることを理解して使うことも必要である。

4.2 変状の進行性を踏まえた安全性評価技術

堤防のすべり破壊に対する照査では円弧すべり安全率が用いられている。この安全率はすべり破壊が生じるかどうかを表すものであり、必ずしもすべり破壊が生じた後の堤防の決壊に対する安全性を表すものではない。変状の進行性を考慮することにより、堤防の決壊に対する安全性により近い評価が可能となる。また、このような評価技術は、決壊に対する信頼性を考慮した設計法を検討する上でも必要な技術である。

筆者らは、大型浸透模型実験結果を参考に、すべりの進行性を評価する方法を開発した⁵⁾。図-4に示すように、円弧すべり安全率が所定の安全率以下となる範囲を、すべりや崩壊が生じた範囲だとみなし、この範囲の強度を低下させる。この結果、所定の安全率以下となる範囲が拡大する。水位が変化する度に、このような手順を繰り返すことで、進行性を考慮する方法である。図-5に大型浸透模

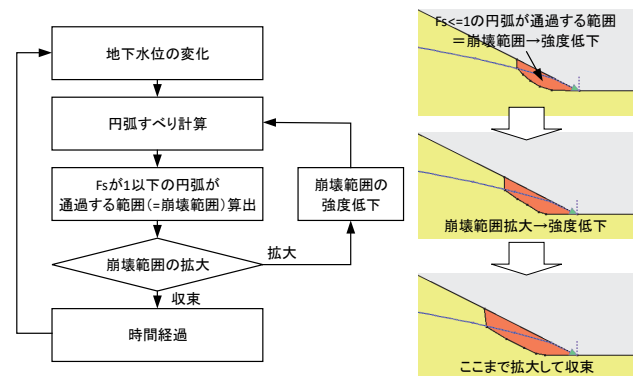


図-4 計算フローと崩壊範囲の拡大イメージ

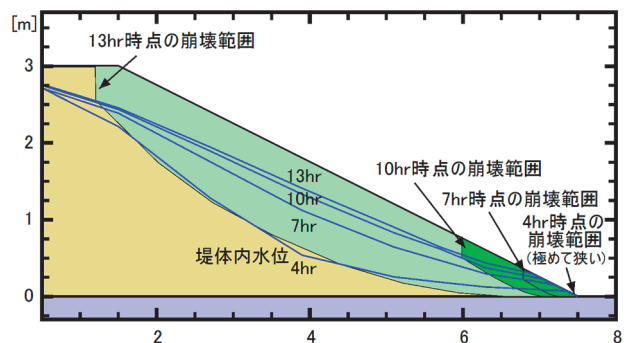


図-5 大型浸透模型実験を対象とした試算

型実験を対象として崩壊範囲の拡大を試算した結果を示す。このように崩壊範囲の進行を考慮することが可能である。

4.3 堤内基盤排水対策

矢部川で発生したような基盤漏水への対策としては、川表側の法尻付近に遮水矢板等を打設し、基礎地盤の透水層への河川水の浸透を防ぐ川表遮水工法が一般的である。しかし、透水層が厚い場合や、礫層等で固い場合には、遮水矢板の打設が困難となる。また、地下水利用が行われている場合等では、川表遮水工法が不適と判断されることもある。このような現場条件においても適用できる対策として、図-6に示すように堤内地側法尻付近に対策工を設置して、基盤透水層の水を穏やかに排水し、法尻付近の透水層の水圧を低減する対策が、堤内基盤排水対策である。

土木研究所では、対策効果に係る模型実験や浸透流解析による試算等の様々な結果^{6,7)}を整理したマニュアル⁸⁾を公開している。

本対策の施工実績は近年増えてきているものの、川表遮水工法に比べ遥かに少なく、現時点ではフィルター材やその周辺の透水層の目詰まりの進行、それに伴う対策効果への影響などが十分実証されていない。このため、川表遮水工法等の他の対策が実施できない場合に限り適用できるという制限を設けている。

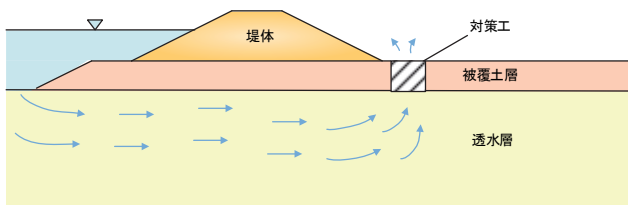


図-6 堤内基盤排水対策の概念図

5. まとめ

浸透による近年の被災事例とその特徴を紹介するとともに、効率的に弱点箇所を把握するための調査技術としての物理探査、変状の進行性を踏まえた浸透に対する安全性評価技術、より合理的な対策工法の開発に向けた取組みを紹介した。

温暖化の顕在化に伴い、水災害の激甚化が想定されており、堤防の浸透破壊を発端に激甚な水害が発生することも懸念されている。今後も、被災事例を踏まえた堤防の安全性向上に資する取組みを継続する予定である。

参考文献

- 1) 高梁川水系小田川堤防調査委員会：高梁川水系小田川堤防調査委員会報告書、2020.
- 2) 杉山ら：法すべり等が生じた小田川における開削調査、第55回地盤工学研究発表会、2020.
- 3) 矢部川堤防調査委員会：矢部川堤防調査委員会報告書、2013.
- 4) 石原ら：最上川における漏水・法面陥没の被災メカニズム推定に係る調査、第8回河川堤防技術シンポジウム、2020.
- 5) 石原ら：堤防の浸透による法すべりの進行性を考慮した評価法と対策工の提案、土木技術資料、第61巻、第8号、2019.
- 6) 佐々木ら：大型模型を使用した河川堤防の盤膨れ対策に関する研究、土木研究所資料、No.4267、2014.
- 7) 佐々木ら：円柱縦型ドレーンを使用した堤内基盤排水対策に関する研究、土木研究所資料、No.4413、2021.
- 8) 土木研究所土質・振動チーム：堤内基盤排水対策マニュアル（試行版）、2021.

石原雅規



土木研究所地質・地盤研究グループ 上席研究員（河川堤防強化・補強担当）
ISHIHARA Masanori

尾西恭亮



土木研究所地質・地盤研究グループ地質チーム 主任研究員、博士（工学）
Dr. ONISHI Kyoussuke

佐々木哲也



土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム 上席研究員
SASAKI Tetsuya

宮武裕昭



土木研究所 地質・地盤研究グループ長
MIYATAKE Hiroaki