

オーガナイズドポスターセッション1 (OPS1)

「堤防の浸透破壊～目に見えない堤体・基盤内からの破壊～より深い現象の理解と堤防管理の高度化を目指して」 記録

2013年6月6日(木) 11:20～12:30

企画・進行：堤防WG

1. 企画趣旨

昨年度、矢部川において堤防基盤の漏水から浸透破壊へ進展したことを主因とする破堤が生じた。直轄河川でのこの種の被災事例としては、長良川安八地先の破堤(1976年)以来である。その間に浸透破壊について種々の研究・技術的検討がなされてきたが、本OPSではそれらについて以下の観点から改めて討議したい。

浸透に対する堤防弱部の点検としては、平時には絞り水や湿潤部、出水後にガマを見つける、水防時には漏水の水の澄み具合を観察する等の経験的な知見に基づいて種々の判断がなされている。一方、堤防の安定性照査においては、浸透破壊の生じうる基礎地盤面近くの砂主体の層の分布をボーリング等で的確に捉えることが重要である。また、基盤からの浸透対策としては、止水矢板、堤体拡幅、ドレーン工、リリーフウェルなどが用いられている。

こうした種々の対応について検討する際の基本的な現象理解が「パイピング」である。専門書においても、土砂が浸透してきた水流により運搬されて、モグラ孔のような空洞が堤体下に伸張していく、というプロセスがよく記載されており、一般的にもそうした認識で議論することが多い。しかし近年の研究を紐解くと、現象・プロセスが学術的に確立されているとは必ずしも言えないようである。

そこで、現地での示唆に富む事例、最近の実験・理論的検討についての基調講演から、今一度、浸透破壊とはどういう現象か認識を深めていきたい。そのうえで、先の点検・照査・対策をはじめとする種々の対応に繋げていく今後の研究・調査のあり方について多角的に議論したい。なお、堤防WGは地盤工学会堤防研究小委員会と連携してこれについて検討しているところである。本OPSの議論の端緒とすべく、その検討で整理した幾つかの切り口について紹介したい。

2. 議事次第

1) 趣旨説明

- ・ 国土技術政策総合研究所河川研究室 室長 服部 敦 (堤防WGリーダー)

2) 話題提供

- ① 国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所 所長 渡部秀之
矢部川被災原因調査
- ② 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 佐々木哲也
実験・現地調査で捉えられた浸透破壊現象
- ③ 名古屋工業大学高度防災工学センター 教授 前田健一(侵食・浸透破壊・洗掘WGリーダー)

地盤工学での浸透破壊の研究動向

④ ダイヤコンサルタント砂防・防災事業部 副事業部長 藤本弘之

土木学会水工委員会河川部会「堤防 WG」・地盤工学会堤防小委員会「侵食・浸透破壊・洗掘 WG」合同 WG の議論概要

3) 全体討議

3. OPS の議事要点

3.1 発表概要

(1) 企画趣旨の説明（服部：[資料 1-1](#)）

- ・ 矢部川の破堤は基盤からの浸透破壊が主原因とされている。類似した事例は、直轄河川では長良川安八地先の破堤であり、概ね 40 年ぶり。
- ・ 現地では堤防の再点検が行われたが、堤防 WG としては技術の再点検を行いたい。
- ・ 浸透破壊、特にパイピングについては、現象・プロセスが学術的に確立されているとは必ずしも言えない、再度、考え直してみる必要がある、という認識。
- ・ 本セッションでは、現場や実験で確認された事例・事象を下敷きとして、水工学と地盤工学の慣用的な考え方を交流させて議論するというアプローチでもって、浸透破壊現象の認識を深めるとともに、今後の研究・調査のあり方について討議したい。

(2) 矢部川堤防決壊の被災メカニズムに関する考察（渡辺：[資料 1-2](#)）

- ・ 矢部川ではパイピングで堤防が決壊した。河川水位は、船小屋地点で氾濫危険水位を 5 時間以上超えた。決壊は水位が下がり始めたところに発生。
- ・ 詳細な調査を行った結果、被災箇所付近の限られた範囲に砂層が分布しており、堤内地側で行き止まりになっていたこと、この砂層上の難透水の被覆土層に高い揚圧力が作用したことが原因と考えられた。
- ・ 浸透流計算で裏のり尻付近の G/W が 1 を下回ることを確認した。また、浸透流計算から得られる流速と粒径から推定される限界流速の関係をもとに、砂層の一部の粒子が動く可能性があることが推定された。
- ・ 地元の人にヒアリングを行ったところ、のり尻付近で 1m 位の水柱とともに濁った水が噴き出したこと、その後 1m 位の幅で陥没し、それから一気に天端まで崩れたことなどの証言が得られた。

(3) 実験で捉えられた堤防の浸透破壊現象（佐々木：[資料 1-3](#)）

- ・ 基礎地盤のパイピング実験：幅 4m、高さ 2m 程度の堤防模型。いろいろな砂を使って実験を行っている。限界流速、限界動水勾配は土質材料の粒度分布によって違いが出てくる。実験後に開削するとトンネル状のパイピング孔が確認された。細粒分が多い砂や均等係数が大きい砂はパイピングが起きにくい傾向がある。
- ・ 堤体の浸透破壊実験：細粒分が少なく締固め度が低いと内部侵食的な現象（堤防がのり尻から溶けていくような現象）が生じやすく、細粒分が多く締固め度が低いとすべり破壊的な現

象が生じやすい。

- ・ パイピング対策に関する遠心模型実験：透水トレンチで水を抜くことによる効果は確認されている。設計上は透水トレンチの排水能力の設定において、地盤調査の不確実性等を考慮した安全余裕の考え方等に課題がある。

(4) 地盤工学での浸透破壊の研究動向（前田：[資料 1-4](#)）

- ・ 土粒子レベルと土のマスレベルについて、つり合いモデルでは話がつながっているが、実際に実験を行うと、細かい粒子が動き、破壊する前に変形が起きている。
- ・ 農工研で実施したため池に対する降雨実験では、漏水とともに細粒分が出てきた後、堤体の中から大きな石が出てきて、孔が詰まってしまう現象が確認されている。さらに、別の箇所から漏水が始まったり、土塊の動きを誘発したりすることがある。
- ・ 矢部川のような堤防を模擬した浸透実験（堤体と基盤は粘土でその間に透水層を有する模型堤防）では、堤体下の層が、豊浦砂の場合では漏水はするものの粒子が動かず破壊しない。一方で、細粒分を含む層の場合は細粒分が抜けて漏水が助長したり堤体の進行的な破壊が生じる。透水層中の圧力勾配を測ってみると、複雑な圧力分布が確認された。また、この圧力分布（圧力勾配）は時間とともに変化し、最大の勾配を示す箇所も全体の変形や破壊と連動して移動している。
- ・ 一次元の透水実験を行ってみると、粒度分布が下に凸の形状を示すものは、細かい粒子が抜けやすく、抜けることでさらに下に凸となり抜けやすくなる。粒子レベルで不安定な状態は粒度分布の形状に左右される。
- ・ 土の要素レベルでは、時間とともに粒子が抜けていくと、供試体全体の透水係数は小さくなる。間隙比をみると抜けて緩くなるところと、詰まるところが交互に出てくる。粒子が詰まったところでは圧力勾配が上がる。
- ・ なぜ下に凸な粒度分布をもった材料で細粒分が抜けやすいかについて、個別要素法を使って計算してみると、下に凸な粒度分布をもった材料では大きな間隙がより長く連続していることがわかった。
- ・ 土塊にかかっている応力が一定であっても、粒子が抜けて間隙が大きくなり、土粒子骨格の耐力が弱くなることで、塑性変形が起きる。計算上は、せん断応力が作用していれば、原粒度の5%粒径まで流出すると破壊してしまうことがある。
- ・ 粒子法を使って、堤内側の法先から漏水が発生し河川水位一定値の条件で計算すると、細粒分が抜けない場合では法先の膨れ上がりは生じるが変形の進行は停止する。一方、細粒分が抜ける場合では局所的な変形とすべりが進行し破堤するという結果が得られ、比較的実現に近い計算結果が得られた。

(5) 地盤:堤防小委員会「侵食・浸透破壊・洗掘 WG」＋水工:河川部会「堤防 WG」 連携合同会議
（藤本：[資料 1-5](#)）

- ・ 浸透破壊とは、実際にどのような現象が起きているか、どのようなプロセスで破壊に至るかということが工学的にきちんと整理できていないのではないかと。特に、進行性破壊について

の理解や認識はあまりにも漠然としていないか、との問題認識のもと、地盤工学委員会堤防小委員会の「侵食・浸透破壊・洗掘小WG」と、水工学委員会河川部会の「堤防WG」との合同会議を設置した。2013年2月から活動を開始し、過去2回開催している。

- ・ 第2回の合同会議では、現場で起こっていることをよりの確に理解するために、各メンバーが見てきた様々な事例を収集・整理した。
- ・ 集まった19の事例について以下の4つの視点で整理した。
 - ・ 降雨・河川水の堤防・基礎地盤への浸透
 - ・ 変状の形態
 - ・ 変状の発達（脆性・延性と進行性破壊）
 - ・ データの情報化（現象解明と危険の事前察知）
- ・ 変状の形態については、浸透破壊に関する諸現象と影響要因を抽出するとともに、のり面の崩壊、基礎地盤のボイリングやパイピング、内部侵食等の現象に係る課題を整理した。
- ・ 変状の発達（進行性破壊）については、現象の違い、見分け方、評価に関する課題を整理した。
- ・ 今後は、浸透破壊に関する既往の知見を整理して、取り組むべき研究の課題と方向性について検討する予定である。

3.2 全体討議

会場：今回の話題提供では、堤防の一部がぼんと落ちるなど瞬間的に生じる現象と塑性変形のように堤防全体で変形するような徐々に進む現象があるというのが印象的だった。ところで、前田先生の話題提供にあった塑性変形はどの程度の時間スケールの現象か。

前田：5mくらいの堤防で2時間程度。

会場：塑性変形と言いながら、水が土砂を運ぶことが時間スケールを決めている現象となるという解釈ですね。

服部：細粒分が5%程度徐々に抜けるだけ強度を失う。これは浸透破壊の一種。一方、細粒分の移動により間隙が閉塞し、圧力がかかって瞬間的に発生する現象もある。

会場：矢部川のようにパイピングが徐々に進行し、せん断面の発生という瞬間的に大きな変状が発生したものもある。研究においては、二極化して扱うのか、両方やらないのか。

佐々木：徐々に進行するか、瞬間的に発生するかは、様々な要因で決まる。徐々に進む現象と瞬間的な現象を一つに捉えるかは議論が必要と考える。

前田：粘性土は亀裂が入りにくく、変状が発生する際も何回かすべり面が入った可能性がある。

渡部：矢部川では水防団の方から破堤直前に1m程度水が噴いていたという報告がある。

服部：補足すると水柱は1m程度で1m程度の幅で法尻部から崩壊したと聞いている。濁った水は危険なサインであり重要である。一方、前田先生の研究紹介からは、普段からの漏水で細粒分の流出が発生するとすれば、漏水そのものも危ないサイン、というような発想もありはしないか。この例のように発想を広げてみて、改めてパイピング現象について、今後どのような方向で研究や実務の対応を進めていけばよいか。

会場：パイピングが発生する層を見つけることが課題。特殊な条件が重なったところでパイピ

ングが発生する。それをいかに見つけるかが重要。

服部：現在はボーリングが主流であるが、それによって、例えば矢部川破堤地点に分布していた長さ 100m、厚さ 0.5-2.0m の砂層を検知できるかは疑問。このような薄くて範囲が狭い層を確実に検知する技術は大事な課題。

会場：矢部川では、堤防決壊と旧河道との関係はどうか。

渡部・服部：治水地形分類図に示された旧河道と破堤地点はほぼ重なるが、発表にあったボーリングやトレンチ等の調査からは、周囲の Ac 層を掘り割るような形でいわゆる旧河道内に砂が堆積しているような状況は確認できなかった。確認された砂層は、現況の河床面より高い標高に、位置しており自然堤防と同様な堆積物と考えられる。旧河道についてステレオタイプの見方はできないが、治水地形分類と堤防弱点箇所に関する視点は今後も重要な課題である。

会場：今回の事象を受けると、下に凸になる粒度分布曲線は河川における堆積物としてごく一般的であることを加味すると、パイピングの安全度の診断においては、粒度分布を考慮しなければならない、細粒分を何らかの形で反映させる、ということが重要ではないか。また、この種の事象を事前に予測することの難しさを踏まえて、我々がどこまで事前に検知できるかというような議論が別途あるのではないか。

前田：パイピングの判定基準はフィルター材の基準を使うことができると考えている。流速と粒度のチャートを今後どうするかは議論があるが、フィルター材の基準と流速で判定精度を向上できると考えている。

佐々木：検知技術については物理探査技術などがあるが、適用性については十分に検証されているとは言い難い。弱点箇所をどう見つけるかについては課題が多い。今後研究を進めていきたい。一方で、矢部川の事例でも HWL を超えたところで被災が生じており、堤体土や地盤の複雑さを考えると定規断面や HWL など先人の知恵はあなどれないとも感じている。

服部：細粒分の流出については、水理学的に扱えるところもあると思う。興味がある方にはこの手の課題について研究していただくと有難い。

4. OPS を終えて 発表者からの一言

・渡部

矢部川堤防調査委員会での議論に加え、当セッションでの研究紹介など、関係の皆様には多くのご指導をいただき、お礼を申し上げます。矢部川の事例の調査分析で確認したことは、委員会報告書として、筑後川河川事務所のホームページで公表しています。今後のより適切な堤防管理のため、矢部川の堤防が決壊したという事実をより詳細に説明できるメカニズムの構築や、堤防や基礎地盤の物理定数のより詳細な把握が可能となるよう、水工学及び地盤工学の知見が一層高められることを期待しています。

・佐々木

浸透破壊は土の粒度分布等によりその発生状況は異なるが、その影響、メカニズムは未だ解明されていないと改めて感じた。実務的にはどのような材料等の条件で浸透破壊が生じやすいかを明らかに

するとともに、延長が長くかつ複雑な堤体、基礎地盤条件の中から、いかに的確かつ効率的に弱点箇所を抽出するかが大きな課題である。水工学、地盤工学等の様々な分野においてこれらの課題について取り組む必要があると考える。

・前田

パイピングなどの進行性破壊を理解するには、浸透や掃流を受ける粒子レベル、粒度分布・粒度形状を有する土塊レベル、地層構造レベルやその境界、堤体全体レベルといった異なるスケールで起きている現象がどのように関連しているのか（どんどん不安定性さを生み出すのか、安定化に向かうのかなど）、という階層間を繋ぐような解釈と評価・調査方法が必要であると感じた。これらの研究と実務に適用できるような技術開発の課題の整理と取り組みを、水工学と地盤工学が共同で行うことが重要であると再認識した。

・藤本

昨年度発生した矢部川における堤防基盤の漏水から浸透破壊へ進展したことを主因とする破堤は土木技術者にとってホットな話題であり、その要因や今後の課題等について、学会を通じて発注者や研究者等で議論されることは非常に有意義であると感じました。今後もこのような会がタイムリーに設けられることが学会や建設業界にとってもよいことであると思います。

・服部

全体討議では、会場・各発表者からの的確な意見・コメントの交換があり、当方の司会進行の不備にもかかわらず、当初の目的に大筋沿った議論ができたように思われた。討議にご参加いただいた方々に改めてお礼を申し上げたい。

今後、全体討議の議論を端緒としてさらに検討を深めていくことが求められる。例えば今回の矢部川の破堤事例は、これまで漏水の形跡が認められなかった堤防区間において、観測史上初めて経験する高水位に至る出水があり、そのただ一度の出水の間に基盤からの浸透破壊が破堤に至るほど進行するというものであった。このようなことが実際に生じうるという実事例を見たことは、状態監視を基本とする堤防点検にとって大変に難しい課題が顕在化したと感じている。また、矢部川の他の区間ではのり尻部の変状や噴砂痕が認められたが、辛くも破堤を免れている。こうした区間と破堤区間とを分けた要因は何であったのか。これも堤防の安全性評価、ひいては補強の優先順位の検討において是非にでも知りたい情報である。

堤防 WG では、地盤工学会堤防研究小委員会との連携の下、全体討議で示された事項を踏まえて、引き続き検討を深めて参りたい。また、同様な考えを抱いている方々にとっても、本報告書と各発表者の発表資料が、今後の研究・技術開発の方向性の検討に少しでも役立てば幸いである。

以 上