

オーガナイズドポスターセッション 2 (OPS2)
「河川堤防の効率的補強に関する技術的課題とその取り組みの方向性」

日 時：平成 27 年 6 月 10 日 15:00～15:50

オーガナイザー：服部 敦（国土交通省・国土技術政策総合研究所）

○主旨説明（服部）

2012 年の OS で堤防を大きく取り上げた。そこでは、河川と地盤工学、または河川工学と堤防の見方をどのように融合していくか、少し広いビジョンでの議論を行った。また、堤防が流れを変え、流れが堤防にかかる外力を変え、また堤防がそれを受けてできている一連のシステムであることに意識を向けようとした。それを受けて実際にその中の一部でも取り組んでいこうと 2012 年から始まったのが連携 WG*である。その年に矢部川の破堤が発生し、連携 WG でもこれを重要視し、主要な課題として取り上げることにした。翌年の OPS で、抽出した教訓と課題について発表した他、地盤工学委員会主催の堤防シンポジウムで発表し、さらに今回のシンポジウムでの発表に至っている（スライド-1 参照）。さらに、矢部川の事例によって浮き彫りにされた教訓・課題については、大きく 3 つにまとめられている（スライド-2 参照）。

*連携 WG…河川部会堤防 WG（代表：服部敦）と地盤工学委員会堤防小委員会浸食、浸透破壊、洗掘 WG（代表：前田健一）との合同 WG の略称

スライド-1

連携WGの活動状況

※地盤工学委員会堤防研究小委員会と合同で活動

- 2012/2/18: 連携WG活動開始(第10回まで開催)
- 2012/7/14: 矢部川破堤(九州北部豪雨)
- 2013/6/6: 河川シンポOPS:「堤防の浸透破壊～より深い現象の理解と堤防管理の高度化を目指して」
→教訓・課題の抽出
- 2013/11/25:「第1回 地盤工学から見た堤防技術シンポジウム」(主催:地盤工学会、後援河川部会)
- 2014/6/6: 河川シンポ活動報告
- 2014/12/9:「第2回 地盤工学から見た堤防技術シンポジウム」
- 2015/6/10: 河川シンポOPS:「堤防の浸透破壊～より深い現象の理解と堤防管理の高度化を目指して」

スライド-2

矢部川破堤事例によって浮き彫りにされた教訓・課題

- ① 破堤した区間以外に、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区間があった。これら区間と破堤区間では、浸透破壊に関する安全性が十分でなかったことが報告されているが、両者を分けた要因についてはなお明確な説明が与えられていない。
- ② 破堤の原因については、多数のボーリング調査を含む基礎地盤の詳細な土質調査を行った結果、被災箇所付近の限られた範囲に堤内地側で行き止まりになっている砂層が関係していた。こうした局所的な砂層を検知しうる高い密度の調査を全川の行うのは困難である。
- ③ 矢部川の破堤箇所を含む一連区間の既往の目視点検結果からは、漏水などの変状と思われる形跡が認められなかった。状態監視を基本とする堤防目視点検のみでは、破堤に至るような危険箇所を特定することができない場合があることを示唆している。

本セッションでは、それぞれの教訓・課題についての取り組み事例について発表していただき、最後に全体討議を行う予定である（スライド-3 参照）。

矢部川は基盤漏水で破堤したことになっているが、連携 WG では、これまでに言われているパイピングのような現象が本当に起きるのかといった点に踏み込み、現地での示唆に富む事例、最近の実験・理論的検討から、今一度、浸透破壊とはどういう現象か認識を深めるとともに、調査・評価・対策・維持管理といった現場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。さらに、3つの教訓・課題に対する取り組みの方向性についてまとめた（スライド-4 参照）。本セッションでは、これらを切り口として議論を進めたい。

スライド-3

OPS2: 議事次第

- 進行: 服部 敦(堤防WGリーダー)国土技術政策総合研究所河川研究室長
1. 企画趣旨、OPSの進め方の説明(5分)
 2. 発表 (OS2発表論文から) (30分)
 - 2.1 教訓・課題①への取り組み
前田健一: 名古屋工業大学都市社会工学科 教授
 - 2.2 教訓・課題②への取り組み
松本健作: 群馬大学大学院理工学環境創生部門 助教
 - 2.3 教訓・課題③への取り組み
森 啓年: 国土技術政策総合研究所河川研究室 主任研究官
 - 2.4 まとめ
溝口敦子: 名城大学社会基盤デザイン工学科 准教授
 3. 会場・発表者交えての全体討議(15分)
司会: 溝口敦子: 名城大学社会基盤デザイン工学科 准教授
李 圭太: (株)建設技術研究所大阪本社 水工部長

スライド-4

「教訓・課題への取り組み」

- ◆教訓・課題① **破堤に至るか否かを分けた要因**
 - ・優先的な補強: 破壊発生(安全率)から破堤への進行判定へ
 - 変状発生からその進展を記述する**進行性破壊**モデル
- ◆教訓・課題② **高い密度の調査を全川的に行うのは困難**
 - ・危険箇所の特定: 調査データの制約をどのように克服するか
 - 土の不均質性・疎なデータを前提とした危険箇所の推定技術
- ◆教訓・課題③ **状態監視のみでは危険箇所を特定できない**
 - ・現場の持てる情報と経験知を総動員した技術的判断の必要性
 - ①,②を補完する経験的知識の体系化・経験的技術の研鑽
- ◆まとめ
 - ・上記①～③に関わる近年の研究動向: 発表論文数で大掴みに
 - ・連携WGで抽出した取り組み項目と調査・評価・対策・維持管理との関連図
 - 本OPSの議論の参考情報として

○教訓・課題①への取組み

名古屋工業大学 前田健一

破堤に至るか至らないかを見分ける技術があれば、どこを重点的に早く対処しなければならぬかが見えてくる。今の照査法や今までの研究はパイピングが発生する直前のところまでを対象としていたが、それがどういう条件で進行するかということを解明し、そのモデル化を考えなければならない。これに対して、連携 WG では、局所動水勾配だけでなく他の視点を導入することで、さらに踏み込んだ性能照査ができるようになるのではないかと議論があった(スライド-5 参照)。

スライド-5

教訓・課題①: 破堤に至るか否かを分ける要因

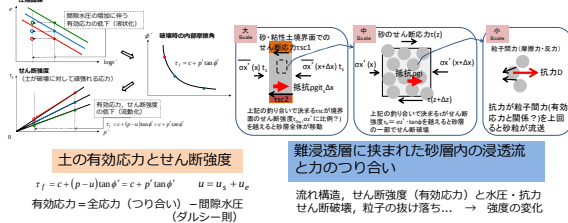
1. 外カシナリオと地盤特性の組み合わせ
 - 今まで耐えていた; 一気に破壊
 - (豪雨), 高水位とその継続時間
 - 現象 (パイピング, すべり, ...) の複合化← (別々の照査)
 - 進行性破壊による破壊の大規模化によるリスクの増大
 - 見逃している, 分かったような気になっている地盤要因?)
(ex)旧河道は弱部と言われているがなぜ?
2. 優先的補強のための破堤するかどうか「判別する技術」
 - 破壊発生(安全率)から破堤への進行判定へ
 - 変状発生からその進展を記述する進行性破壊モデル
 - 局所動水勾配だけでなく他の視点の導入
 - ・局所動水勾配 → 変状発生条件?
 - ・層構造, 三次元的流れ, 漏水特性, 土粒子~間隙流体の速度, 細粒分流出...
 - マルチなスケールで観察の必要性: 主要パラメータの導出
 - 構造体としての性能照査と破壊制御

1

また、地盤工学・水工学分野における堤防破壊機構の整理を行った。堤防の破壊は、堤体としての構造物のスケール、土塊のスケール、粒子のスケールなど、色々なスケールで色々な現象が連鎖して起きており、それらが連鎖している。それを紐解くことで重要なパラメータが何かを判断する技術が見い出される(スライド-6, スライド-7 参照)。

地盤工学・水工学分野における堤防破壊機構の整理
(土-水の捉え方)

(1) 浸透層内の土の挙動の捉え方

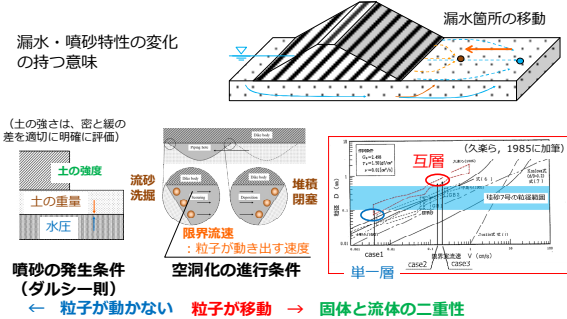


- いろんなスケールで起きる主なダイナミクスとは？
 - 進行性破壊につながる重要なスケールとは？
 - スケール間の相互作用は破壊を連鎖・進行させるのか？
 - その重要なパラメータは何か？
- ⇒ (判読する領域)

2

地盤工学・水工学分野における堤防破壊機構の整理
(パイピング過程)

(2) パイピング現象に向けた要素の抽出



3

このような議論を踏まえて、ポスターセッションで議論されていた内容を簡単に紹介する。

矢部川を想定した堤体が粘土でその下に透水性の基盤がある場合について、基盤が豊浦砂だけのケースと、細かい砂と粗い砂の二層のケースについて実験した結果がある。どちらのケースも平均動水勾配が 0.2 で漏水しているが、豊浦砂単層の場合には破壊は進行しない。一方、二層の場合は、漏水が次第に濁ってきて、矢部川で見られたようなパイピングが進行してのり面が陥没する現象が再現される。後者では、下層の粗い砂を流れる流速が大きく、上層の細かい砂を流すのに十分な流速が得られていることが分かった。水圧と土の重さのバランスでパイピングの切欠が生じるが、その後破壊が続くためには粒子を押し流していく力が、どこからか発生しなければならないことが分かってきた。

国総研で実施した規模の大きい実験では、基盤を単一の透水層とした場合についてはパイピングではなく堤体が崩れる形態であったが、細かい砂と粗い砂礫の二層とした場合にはパイピングの発生によって非常に大きな破壊に至っている。しかも、変状に至るまでの限界動水勾配が前者よりも低い値で起こっていることが分かった。

以上のことから、水位が同じであっても、土質との相互作用によって構造体の壊れ方が違ってくる。そのため、堤体の崩壊が先か基盤層のパイピングが先かなど、予測される破壊形態を見極め、どこが危ないかを見分ける技術がないと堤防の構造体としての性能を語れないことになる。

○教訓・課題②への取組み

群馬大学 松本健作

河川堤防では土質が不均質であること、線状で長大であること、その上で均質な安全性が要求されていることなどの難しさがある。密なデータをとっていく努力はしていくべきであるが、実際にはなかなか得られない。そのため疎なデータに立脚して何ができるかを考えていかなければならない。一つの例として、群馬大学では桐生川の横に地下水観測孔を 2 つ設置し、観測孔の中の流速を連続的に観測し、その観測結果をもとに地盤の透水係数を逆解析で推定する試みを行っている。この手法によると、地震や出水の履歴等によって流れやすさが変化する場合に、透水係数の経時的な変化を把握することができる。このような取組みは、限られた投資余力の中でデータを増やしていくアプローチとして検討する価値があるのではないかと考えている。

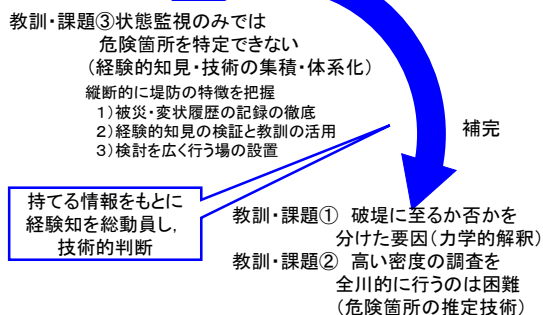
○教訓・課題③への取り組み

国土交通省・国土技術政策総合研究所 森 啓年

不完全なメカニズムや調査について補完するような役割として、経験的な知見や技術をしっかりと活用していく必要がある。一例として、堤防の詳細点検では断面で安全性を評価しているが、矢部川などを見ても局所的な弱部が決壊などの被災に繋がってしまうことがあるため、縦断的のように評価するかということに真剣に取り組まなければならないと考えている（スライド-8 参照）。20 年前に堤防の概略点検を行っているが、これに最近の被災履歴や地盤情報等を反映することによってかなりの高精度化が図れると考えている。そのためには、大前提になる被災履歴や変状をしっかりと記録に残すことが重要である。目視点検のときに見つかった変状の位置と被災の位置を河川流域図にプロットしてみたが、なかなか両者は一致しない。一方、このような情報を蓄積することによって分析ができるようになった。たとえば、のり勾配が 3 割よりも急になると被災確率が上昇することや、平均動水勾配が 0.2 を超えると急速に被災確率が上がってくることが分かっている。堤体と基礎地盤の土質の組合せについては、すべりはあまり傾向が見られなかった。一方、パイピングについては、基礎地盤が礫質土のケースと堤体が砂質土のケースが他よりも突出して多い（スライド-9 参照）。これらのことが定量的に把握できるようになったのが現在の状況である。

スライド-8

教訓・課題③状態監視のみでは危険箇所を特定できない

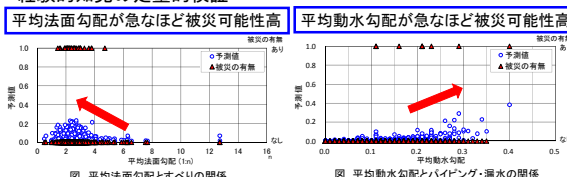


スライド-9

2) 経験的知見の検証と教訓の活用

経験的知見の定量的検証

下川から変状と被災の統計的解析による堤防の点検及び点検の合理化に関する一考察



堤体・基礎土質により明確な傾向なし

基礎礫質もしくは堤体砂質が被災可能性高

表 土質構成別のすべりの予測値

基礎土質	堤体土質	すべり
砂質土	砂質土	0.18
砂質土	粘質土	0.12
砂質土	砂質土	0.04
砂質土	砂質土	0.17
砂質土	粘質土	0.10
砂質土	砂質土	0.11
砂質土	砂質土	0.23
砂質土	粘質土	0.10
砂質土	砂質土	0.09

表 土質構成別のパイピング・漏水の予測値

基礎土質	堤体土質	パイピング・漏水
砂質土	砂質土	0.09
砂質土	粘質土	0.10
砂質土	砂質土	0.01
砂質土	砂質土	0.04
砂質土	粘質土	0.28
砂質土	砂質土	0.07
砂質土	砂質土	0.08
砂質土	粘質土	0.12
砂質土	砂質土	0.09

今後、継続的な分析が必要

このようなことを地道に続けていくことで、堤防のどこが危ないかを経験的に見つけていく技術が必要ではないかと思っている。もちろん、メカニズムや調査の研究にもこれらの結果をフィードバックしていくことが重要である。メカニズムの研究において最も重要なことは、現場で起こっていることをしっかりと把握することであるが、その一つとして 2 年前に発生した子吉川の被災がある。この被災は堤防のすべりとパイピングが両方起こった被災であり、被災後の断面を開削すると非常に特徴的な構造が見られた（スライド-10 参照）。この開削断面から、すべりとパイピングが同時に発生した可能性が指摘された。このようなメカニズムを解明するときには、新たな視点からの力学的な解釈が必要になると考えられる。

また、国総研で実施した実験において、水位の上昇とともにのり尻部がどれだけ変形するかを調べたところ、被覆土層があるケースでは、基礎地盤全体が 6cm 程度盛り上がるように変形したが、被覆土層がないケースでは法尻部が 3cm 程度盛り上がる程度であった（スライド-11 参照）。

このようなデータ等を使いながら、何とか弱点箇所を捜していこうという取組みが今後必要と考えられる。

連携 WG は一旦終了するが、地盤技術者と河川技術者が協働し、経験的知見の検証と教訓の活用を検討する場を継続的に設置して、引き続き堤防の浸透破壊問題に取り組む予定である。

スライド-10

2) 経験的知見の検証と教訓の活用

被災調査の実施による被災メカニズムの検証



図 子吉川堤防被災における開削調査結果

中川博樹、子吉川における堤防被災メカニズムと調査分析結果について 今後、新たな視点からの力学的解釈の検討が必要

スライド-11

2) 経験的知見の検証と教訓の活用

出水中の堤防の挙動の測定

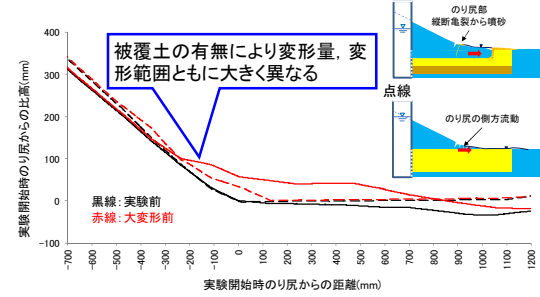


図 模型実験における堤防変状測定結果

今後、さらなる危険箇所推定技術の検討が必要

〇まとめ

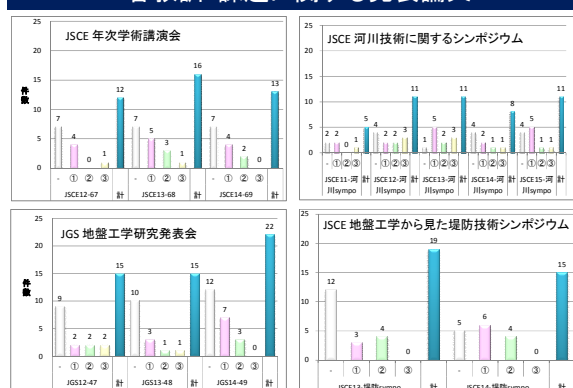
名城大学 溝口敦子, 建設技術研究所 李 圭太

3つの教訓・課題に対応して、過去の発表論文数の傾向について整理した。教訓・課題①のメカニズムについては研究段階の発表論文が比較的多いが、教訓・課題②の調査に関する論文はあまり多くない。また、課題③の経験的判断や維持管理に関する発表論文は少ない状況にある（スライド-12 参照）。

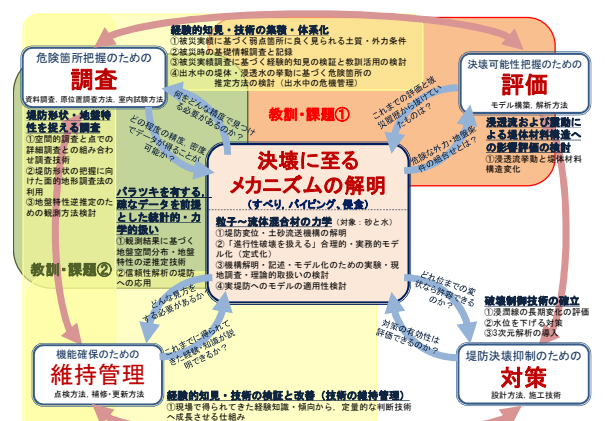
連携 WG では、メカニズムの解明が調査、評価、対策、維持管理の実務とどのように繋がるかに着目してアカデミックリサーチマップを作成した。さらに、このマップと3つの教訓・課題との関連性についても併せて表示した（スライド-13）。このアカデミックリサーチマップで不足している点などがあれば、フロアから意見をいただきたい。

スライド-12

各教訓・課題に関する発表論文



スライド-13



○討議

- ・ここでの議論がパイピングによる破壊問題を前提としており、WG での検討を一旦止めるということであるが、現場の人たちの意識は、延長が長く不確かな材料からなる堤防の破壊問題にあるので、引き続き取り組んでもらいたい。
→ WG の体制が一旦変わるという意味であり、堤防の問題には引き続き取り組む。
- ・アカデミックリサーチマップで堤防の問題が明確になったと思うが、こういう研究の現時点の大事なポイントとして、危ないところが予測できたらどのように対応するのか、ということがあり、それに結びつけられないかと考える。アカデミックリサーチで出てきた課題をどのように防災の問題に使えるか、破堤が起こったときの対応に使えるのかという視点がまだ弱い。WG がメカニズム追求だけでいいのかという点から、管理・評価の面だけでなく、防災対応の面でも研究成果を生かすことを目指して欲しい。
→ 目視点検には限界があると考えており、危機管理対応に関する新しい技術にも取り組んでいきたい。
- ・避難勧告の助言のタイミング等の判断において、巡視だけでは間に合わない実態をサポートする知見を目指していただきたい。
- ・治水課でも危機対応を行っているが、アカデミックリサーチマップについてはうまくまとめて頂いたと思っている。メカニズムの解明と調査・評価・維持管理・対策を連携させて、調査のやり方、目視の点検にメカニズム解明の成果をいかに生かすかが今後重要である。現時点で対策の部分の研究が抜けているが、そこがポイントだと思っているので、今後の展開に期待したい。
- ・関東地整では、現場技術者がボーリングデータを全部見るのをベースとして現場の状況を理解しようとしている。現場では、災害や徴候が起こった時に原因が自分たちで分からなければならぬ。是非とも、現場技術者に対して限定されたデータの見方や有効な使い方がわかるようなアウトプットを示して欲しい。
- ・メカニズムの解明を現場にどうやって役立てていくかが重要であり、官民学が連携して堤防を守っていく必要がある。
- ・次期の WG では、実際にアウトプットを出せるように取り組んでいきたい。また、これまでご指摘いただいたように得られた知見を現場にいかに生かすかということを十分意識して、課題①だけではなく、課題②、課題③に関する論文も増えてくるような河川部会にしていきたい。