堤防研究連携ＷＧ 活動報告書

２０１５年 9月

地盤工学委員会・堤防小委員会：侵食・浸透破壊・洗掘ＷＧ

水工学委員会・河川部会：堤防ＷＧ

目　次

■ はじめに ····· 1

■ 堤防研究連携ＷＧ名簿 ····· 3

■ 河川技術論文集　第 21 巻（2015 年 6 月）　掲載論文（総説）
「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」 ····· 4

■ 掲載資料について ····· 10

■ 堤防研究連携ＷＧの活動経過 ····· 11
○第 1 回（2013 年 2 月 18 日開催） ····· 11
議事録／資料 1-1：堤防研究連携 WG 活動案
○第 2 回（2013 年 5 月 9 日開催） ····· 16
議事録／資料 2-1：各メンバーからの提供資料
○第 3 回（2013 年 7 月 30 日開催） ····· 43
議事録／資料 3-1：第 2 回意見集約
○第 4 回（2014 年 1 月 15 日開催） ····· 47
議事録／資料 4-1：浸透破壊紙芝居 Ver.0
○第 5 回（2014 年 3 月 11 日開催） ····· 73
議事録／資料 5-1：進行性浸透破壊に関する一考察／資料 5-2：浸透破壊紙芝居 Ver.1／
資料 5-3：河川堤防の被災プロセスマップ／資料 5-4：堤防の法面すべり現象に関する疑問
○第 6 回（2014 年 10 月 3 日開催） ····· 96
議事録／資料 6-1：研究開発ロードマップの例
○第 7 回（2014 年 12 月 9 日開催） ····· 105
議事録／資料 7-1：堤防アカデミーリサーチマップ（ARM）
○第 8 回（2015 年 1 月 8 日開催） ····· 108
議事録／資料 8-1：各委員からの研究課題に関する参考資料
○第 9 回（2015 年 3 月 25 日開催） ····· 155
議事録
○第 10 回（2015 年 5 月 14 日開催） ····· 157
議事録

■「2013 年度　河川技術に関するシンポジウム」発表資料 ····· 160
・オーガナイズドポスターセッション（OPS1）報告
・オーガナイズドポスターセッション（OPS1）資料 1-1～1-5

■「2015 年度　河川技術に関するシンポジウム」発表資料 ····· 185
・発表用ポスター
・オーガナイズドポスターセッション（OPS2）報告
・オーガナイズドポスターセッション（OPS2）資料 1～5

はじめに

土木学会水工学委員会河川部会では，2010 年度より堤防等構造物ワーキンググループ（以下，WG）を設置し，産官学合同で河川堤防に関する継続的な検討を行ってきました。また，2011 年に，スタートした土木学会地盤工学委員会堤防研究小委員会内に侵食，浸透破壊，洗掘 WG が設置されました。翌年 2012 年 6 月の河川技術シンポジウムのオーガナイズド・ポスターセッション（以下，OPS）では「河川堤防の安全性に関する技術」の総合的な議論が行われ，堤防が河川の流れを変え、流れが堤防にかかる外力を変え、また堤防がそれに応答するという一連のシステムとして機能していることに意識を向けるべきであることが指摘されました。それらを受けて，堤防に関わる様々な問題への新たな取り組みとして，河川工学と地盤工学の連携が重要であることが再認識されました。そして，その年の 8 月の九州北部豪雨により，矢部川では基盤からの浸透破壊が主原因とされる破堤が生じたのです。同様な破堤事例は直轄本川では長良川安八地先が挙げられ，概ね 40 年ぶりとなる越水なき破堤は，河川管理者，技術者，研究者にも大きなインパクトを与えました。そこで，2013 年より，堤防管理の高度化に繋げていくため，二つの WG では，河川工学－地盤工学の二つの視点とそれらを融合した広いビジョンで議論を進めるために連携 WG がスタートすることになったのです。活動対象を浸透破壊に焦点を絞り，今後重点化すべき研究・技術開発の方向性とその課題について整理することを試みました。本報告書はその活動成果をまとめたものです。

連携 WG では，基盤漏水で破堤したとされる矢部川の事例に着目しながらも，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，といった根本的な点にも踏み込みました。現場での示唆に富む事例から最近の実験・理論的検討まで，今一度，浸透破壊とはどういう現象かという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ための課題，今後の研究・調査のあり方について，多角的に議論をしました。特に，破堤事例から得られた，次の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ています。

【教訓・課題①】破堤に至るか否かを分けた要因

【教訓・課題②】高い密度の調査を全川的に行うのは困難

【教訓・課題③】状態監視のみでは危険箇所を特定できない

まず，①については，破壊発生（安全率）から破堤への進行判定，変状発生からその進展を記述する進行性破壊モデルの課題，優先的に補強すべき箇所の判定と技術選定に関する課題，②については危険箇所の特定のために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の課題，そして，③では，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とその課題，①，②を補完する経験的知識の体系化・経験的技術の研鑽堤防点検・管理に関する技術に関する課題についてです。

報告書では，WG メンバーが研究や実務を通じて体験した多様な浸透および浸透破壊現象に係る事例の紹介や問題意識に関する資料提供，浸透破壊の理解や予測し評価することが可能か，それらの問題点や課題は何か，などについて情報共有し浸透破壊現象の実像について整理した結果を収録しています。また，既往の実験や研究についてレビューを行い，研究レベルにおける浸透破壊現象のとらえ方についても整理しています。つぎに，現象のより深い理解に向け，浸透破壊の進行プロセスについて地盤工学と水工学の両者の視点からメカニズムの図式化「浸透破壊紙芝居の作成」を試みました。そして，上記の整理や議論を踏まえて，浸透破壊について今後取り組むべき技術的課題や研究等の方向性を体系的に整理し，アカデミック・リサーチ・マップ（ARM）を作成しました。これらの成果は，河川技術論文集第 21 巻（2015 年 6 月）に掲載された総説「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」にまとめられています。また，議論内容をより深掘りして理解する資料として，全 10 回の連携 WG 会議で用いた資料・議事録および「河川技術に関するシンポジウム」での WG 活動発表資料（OPS 資料）も掲載しています。

以上のように，連携 WG の活動では，河川堤防に関わる問題と課題を明確にするための大きな一助になったと思います。本連携 WG の活動は，一旦は区切りをつけますが，ここで指摘された課題について，その時々での成果を最大限に活かし，効率的な堤防管理の実現が期待されます。堤防の危険箇所や予測できたら実際の堤防管理にどのように実装するのか，被災の進行メカニズムと調査・評価・維持管理・対策を連携させるにはどのような技術が必要か，調査の仕方や解釈，目視の点検，災害に対する予防や水防活動などにメカニズム解明の成果をどのように活かすのかなどの検討が必要で，連携活動は，新たなステージに展開することが求められています。

今後，本報告書が，河川堤防に関わる各課題の解決に向けて様々な研究者や技術者が関わっていくことを期待したいとおもいます。

土木学会水工学委員会河川部会　堤防ワーキンググループ　(代表：服部 敦)
土木学会地盤工学委員会堤防研究小委員会　侵食，浸透破壊，洗掘ワーキンググループ
(代表：前田健一)

堤防研究連携ＷＧ　名簿

■土木学会・地盤工学委員会 堤防研究小委員会 侵食・浸透破壊・洗掘WG

会務	氏 名	所属	在任期間
小委員会副委員長	佐々木哲也	独立行政法人 土木研究所	2013－2015
小委員会幹事	坂本　淳一	中央開発株式会社	2013－2015
委員	石田　正利	一般社団法人 リバーテクノ研究会	2013－2015
委員	大作　和弘	国土交通省水管理・国土保全局治水課	2015
委員	小高　猛司	名城大学理工学部社会基盤デザイン工学科	2013－2015
委員	酒匂　一成	鹿児島大学大学院理工学研究科	2013－2015
委員	杉井　俊夫	中部大学工学部都市建設工学科	2013－2015
委員	仙頭　紀明	日本大学工学部土木工学科	2013－2015
委員	高橋　裕輔	国土交通省水管理・国土保全局治水課	2013－2015
委員	竹下　祐二	岡山大学大学院環境学研究科	2013－2015
委員	丹下　良樹	基礎地盤コンサルタンツ株式会社	2013－2015
委員	崔　瑛	名城大学理工学部社会基盤デザイン工学科	2013－2015
委員	藤澤　和謙	京都大学大学院農学研究科	2013－2015
委員	藤本　弘之	株式会社ダイヤコンサルタント	2013－2015
WGリーダー	前田　健一	名古屋工業大学大学院社会工学専攻	2013－2015
委員	森　啓年	国土技術政策総合研究所河川部河川研究室	2013－2015
委員	與田　敏昭	株式会社ニュージェック	2013－2015
委員	李　圭太	株式会社建設技術研究所	2013－2015
委員・リエゾン	服部　敦	国土技術政策総合研究所河川部河川研究室	2013－2015

■土木学会・河川部会 堤防WG

WGリーダー	服部　敦	国土技術政策総合研究所河川部河川研究室	2013－2015
部会長	松田　寛志	日本工営株式会社	2013－2015
WG副リーダー	阿部　知之	応用地質株式会社	2013－2015
部会員	松本　健作	群馬大学大学院理工学府	2013－2015
部会員	溝口　敦子	名城大学理工学部社会基盤デザイン工学科	2013－2015
部会員	三戸　雅文	一般財団法人 国土技術研究センター	2013－2014
部会員	三輪　準二	財団法人 河川環境管理財団	2013－2014
部会員	内田　龍彦	中央大学研究開発機構	2014－2015
部会員	安原　達	公益財団法人 河川財団	2014－2015

■オブザーバー

	泉　典洋	北海道大学大学院工学系研究科	2013－2015
	長田　仁	国土交通省水管理・国土保全局治水課	2013
	岡本　弘基	国土交通省水管理・国土保全局治水課	2013－2014

河川技術論文集, 第21巻, 2015年6月

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

FUTURE DIRECTIONS AND IMPORTANT ISSUES ON THE MECHANISM OF LEVEE FAILURE AND ITS COUNTERMEASURES

河川部会堤防ワーキンググループ（代表：服部 敦[1]）
堤防小委員会侵食, 浸透破壊, 洗掘ワーキンググループ（代表：前田健一[2]）
Levee WG of River Task Committee (Representative: Atsushi Hattori) and
Levee Failure WG of Levee Task Committee (Representative: Kenichi Maeda)

[1]正会員 博士(工学) 国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室(〒305-0033 茨城県つくば市旭一番地)
[2]正会員 博士(工学) 名古屋工業大学 高度防災工学センター（〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町）

Levees are the most important river structures. The levee failure and breach on the Yabe River at August 2012 warned us about the danger of seepage flows in the foundation ground of the levee. Understanding the mechanism of failures and evaluating safety of the levees are also the urgent issues for adapting large floods due to climate change. Levee WG of River Task Committee and Levee Breach WG of Levee Task Committee were launched at 2013, corroborating two committees on Hydroscience and Hydraulic Engineering and Geotechnical Engineering of JSCE with the goal of solving the above issues. This paper aims to indicate and discuss the future directions and important issues about the study on the levee failure due to seepage as the first step.

Key Words : *levee breach, seepage flow, Hydroscience and Hydraulic Engineering, Geotechnical Engineering permeable flow*

1. はじめに

直轄の河川堤防においては，詳細点検により総延長の約3割が所定の安全性に満たないとされており，その補強を行い，安全性を向上させているところである．一方，2012年8月の九州北部豪雨により，矢部川では基盤からの浸透破壊が主原因とされる破堤が生じた．同様な破堤事例は，直轄本川では長良川安八地先が挙げられ，概ね40年ぶりとなる．この事例からは，堤防点検・管理に関する技術に関して，下記のような教訓・課題を導き出すことができる．

矢部川では，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[1)]．一方，両者を分けた要因については，補強の優先順位の検討において知りたい情報であるが，なお明確な説明が与えられていない．

また，破堤区間では，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砂層が分布しており，堤内地側で行き止まりになっていることと相まって，この砂層に高い水圧が作用したことが原因と推定されている[1)]．砂層の分布をあらかじめボーリングなど調査で把握しておくことが堤防詳細点検の前提となる．ただし，今回の事例のような局所的な砂層を対象として，その前提を満たすのに十分な高い密度の調査を全川的に行うのは困難である．

堤防の目視点検は，詳細点検との両輪として，安全性を確保するために行われている．矢部川の破堤箇所を含む一連区間での既往目視点検結果では，漏水などの変状と思われる形跡が認められなかった[1)]．すなわち，観測史上初めて経験する計画高水位を超える今回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．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．

こうした技術的課題に取り組むにあたっての基本的な現象理解が「浸透破壊」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プロセス（パイピングとも呼ばれる）で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．

こうした状況に鑑みて，地盤工学委員会堤防研究小委員会浸食, 浸透破壊, 洗掘ワーキンググループと河川部会堤防ワーキンググループ（以下，WGと呼ぶ）は，2013年より連携して活動し，堤防管理の高度化に繋げていくため，浸透破壊に焦点を絞り，今後重点を置くべき研究・技術開発の方向性とその課題について整理することを試みてきた．本論文はその成果を報告するものである．

２．WGの検討アプローチ

WGでは，下記のアプローチで検討を進めた．

1)浸透破壊現象の実像についての整理

WGの各メンバーから浸透及び浸透破壊現象に係る事例の紹介や問題意識に関する資料を提供してもらい，それらがどのようなメカニズムで起きたと理解されているか，浸透破壊を予測し評価することは可能か，それらの問題点や課題は何か，等について情報共有と整理を行った．また，既往の実験や研究についてレビューを行い，研究レベルにおける浸透破壊現象のとらえ方について整理を行った．

2)現象のより深い理解に向けた議論

浸透破壊現象をより深く理解するために，浸透破壊のプロセスについて地盤工学と水理学の両者の視点から図式化等を試み，それらをもとに議論を行った．

3) 今後取り組むべき技術的課題と方向性に関する検討

上記の整理や議論を踏まえて，浸透破壊について今後取り組むべき技術的課題や研究等の方向性を体系的に整理し，リサーチ・マップを作成した．

３．浸透破壊現象の理解に向けた取り組み

(1) 研究や実務を通じて体験した多様な浸透破壊現象に関する情報の共有と整理

研究や実務に携わってきたWGメンバーが，これまで様々な局面で接してきた事象，対策等の検討において隘路となった事項，工夫を要した事項について，情報共有を行った．その結果，以下の３つの観点から集約して整理することができた．

① 浸透破壊の多様な発生形態・プロセス，および円弧すべりに代表されるのり面崩壊現象との区分・共存

- 土質，水位等を系統的に変えた大規模実験事例：泥濘化・流動と見られる法尻からののり面欠損が天端に向かって進展する形態と，せん断破壊面の上部土塊が滑り落ちる，いわゆるすべり破壊の2種類の形態が観測された．どちらが生じやすいか傾向は把握したが，機構の理解が不十分で発生条件を明確にはできていない．
- すべり破壊と浸透破壊の共存・相互作用現象が見られた大型実験事例：一般的なモグラ孔のような空洞を伴う，いわゆるパイピングが進行するなかで，一時的に空洞内に土砂が詰まり湧水量が激減，その直後にのり面のすべり崩壊発生，その後のり尻から再度噴砂が発生するとすべりの進行が停止した．
- 複雑な土層での噴砂発生事例：粘性土を主体とした被覆土層であっても，砂質土の不規則な混入や人為攪乱があると，被覆土層の下面に作用する水圧が被覆土層の重量と比較して低い状態でも噴砂に至ることがある．
- パイピング現象に対する理論的研究事例：一般的にはモグラ孔のような空洞が堤防のり尻近傍に形成され，それが堤体下の基盤中に延伸していくという現象のとらえ方が多い．それに加え，空洞は発達しなくても，基盤中の砂質土から細粒分のみが浸透流により流送され抜け落ちることでも，強度を失い崩壊する可能性が示唆されている．
- 玉石層を基盤表層にもつ堤防陥没事例：玉石層から細粒分が抜け落ちて玉石間に間隙が形成，ここを抜け穴として堤体土が流失することで堤体が陥没した．

② 進行性破壊：破堤に至る現象とそうならない現象の違い，評価

- 土質，水位等を系統的に変えた大規模実験事例[2]：泥濘・流動によるのり面欠損はあるところで欠損部の拡大が止まり，大きな損傷に至らなかった．破堤に至るまで進行する現象と収束する現象に分かれる条件は明解にされていない．変状は発生しても，浸透破壊の進行が鈍く，天端欠損にはほど遠い小規模な被災で留まる事例もあった．

③ 堤防補強優先箇所の判別：点検・モニタリング手法, 蓄積したデータ分析のさらなる工夫

- 矢部川の破堤事例[1]：破堤原因となった砂層は，厚さ1m程度で幅100m程度と狭い範囲に分布していた．こうした局所的な砂質土層の存在を確実にとらえる調査手法が必要である．例えば，現場での継続的な観測や，堤防区間ごとの既往出水による「水位・降雨量別・経験日数」などのデータ整理と点検結果（変状の有無など）との突き合わせによる「症歴」の分析等のアプローチも重要と考えられる．

(2) 浸透破壊現象に関する解釈の動向と課題の整理

a) 古典的パイピング現象

基礎地盤のパイピング実験：幅4m，高さ2m程度の堤防模型[3]．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．

水平方向の浸透流の湧出が卓越する場での浸透破壊実験では，境界条件などの設定や破壊時の判断が難しく，限界勾配や限界流速に関する実験的検討事例が少なく[4]，評価法が確立されていない．

b）新たな知見

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[5]．この結果は，湧水に伴って堤体・基盤の構成材から細粒分が抜けて流失すると塑性変形が生じ，結果として堤体が崩落するというような被災に繋がる可能性を示唆する．経年的に漏水が継続し，細粒分が失われていく場合を想定すると，経年的な強度劣化が土堤にも生じ得る，というように捉えることもできよう．

一次元の透水実験を行ってみると，粒度分布曲線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[5]．

・堤体と基盤は粘土でその間に透水層を挟む模型堤防を用いた実験では，透水層がほぼ単一粒径の砂で構成される場合では漏水はするものの砂粒子が動かず破壊しない．

一方で，細粒分を含む砂の場合には，細粒分が抜けて漏水が助長し，透水層の進行的な破壊が生じる．また，透水性基盤の上層が細砂で下層が礫質土の場合には漏水とともに噴砂が発生し，進行性の破壊が発生する．透水層の中の圧力勾配を測ってみると，一様に低下する圧力分布とは異なり，階段状に低下するなど複雑な分布となることが確認された．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する[6]．

以上は粒度分布曲線の形状や細粒分の含有率のように，これまでほとんど着目されてこなかった土質を表す指標が，機構が明確になるにつれて，浸透破壊に対する安全性評価において重要性を増してくる可能性を示唆する．

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となった[5]．

４．地盤工学・水工学分野における堤防破壊機構関連項目の整理

種々の破壊形態の機構を記述していく上で，基本となる見方を整理することを行った．ここでは，厳密さを追求するのではなく，種々の形態を大掴みにしかし統一した見方で機構を解釈することを目指して，原理は極力少なく，場合分けの数を増やさないことを前提とした．

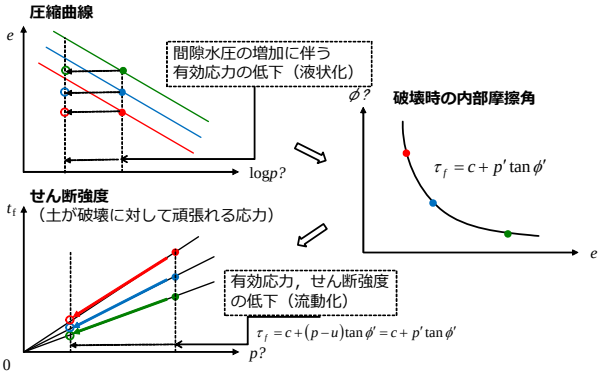


図-1　有効応力とせん断強度

以下では，泥濘化の対象となる砂質土（ϕ材）を念頭に置いて議論を進める．

(1) 浸透層内の挙動のとらえ方

浸透流に伴う土の挙動（土塊に作用する力のつり合い，変形の発生と大きさ）を扱う基本的な見方は有効応力である．これに基づくと，土塊に作用するせん断応力が次式で求められるせん断強度を上回った場合に，土はせん断破壊し，大きな変形が発生する．

$$\tau_f = c + (p-u)\tan\phi' = c + p'\tan\phi'$$

$$u = u_s + u_e$$

ここで，τ_fはせん断強度，cは設計定数としての粘着力，ϕ'は有効応力に対する破壊時の内部摩擦角，p，p'は全応力と有効応力，u,u_s ,u_eは間隙水圧，静水圧，過剰間隙水圧である．また，ϕ'は間隙比eが大きくなる（緩む）と減少するため，模式的には**図-1**に示すようにせん断強度，有効応力，間隙比が関係づけられる．間隙比の変化要因としては，1）土塊の体積ひずみによる膨張・収縮，2）浸透流による土粒子の抜け落ち（流失）またその逆の流送されてきた土粒子が土粒子間空隙への詰まり（集積）が挙げられる．土塊の堆積膨張や細粒分の流失により間隙比が増加すると，摩擦角度が減少し，その結果としてせん断強度が低下することがせん断発生の引き金になる場合も考えられる．

この考え方に基づくと，パイピングの進展に伴う孔壁面の崩壊やのり尻の泥濘化は，地表面近傍における浸透流によって過剰間隙水圧が増加し，土粒子間の有効応力が減少することで骨格構造が乱れ，表層が崩れる現象として説明できる．また，間隙比が大きくなると透水性も高くなり，浸透流速が大きくなることで，粒子の移動が生じる．せん断挙動と粒子の搬送を伴う流れとの両者の相互作用によって，堤防表層の変位（間隙比の変化，地表面のせん断変形）が生じるといえる．この相互作用が，

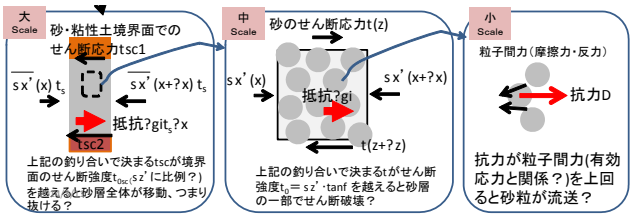


図-2 難浸透層に挟まれた砂層内の浸透流と力のつり合い

破壊が進行するのか，ある段階で収束するのかに強く影響し，進行性破壊の鍵を握っていると考えられる．

せん断強度（すなわち有効応力）に増減をもたらす過剰間隙水圧の算出には，ダルシー則が適用でき，土粒子が移動しない“遅い流れ”を考える従来の地盤工学的視点と，土粒子の移動をみとめ土粒子群に作用する静水圧成分による浮力と浸透流の抗力による水理学的視点の，二つの視点から捉えられる．浮力は一般に堤体のすべりに対する安定性を評価する上で考慮されているが，抗力は必ずしも見込まれていない．不飽和の堤体土が浸潤し飽和すると浮力の分だけ有効応力が減じられるが，浸透流の抗力に比べて浮力の影響が大きいと考えられている．しかし，飽和した浸透層内の浸透破壊の場合には，抗力の分布が有効応力に変化をもたらす主要因と考えられるため，これを適切に見積もる必要性があると言える．

図-2に，難透水層に挟まれた透水層内を水平方向に流れる浸透流を想定し，小スケール（粒子レベル），中スケール（土要素レベル），大スケール（土層レベル）で見たときのせん断強度（有効応力）と水圧・抗力の関係，それに基づくせん断破壊および土粒子の抜け落ちなどのダイナミクスに関する考え方を整理している．これらから，進行性破壊につながる現象に重要なスケール，その判断に必要なパラメータなどを判断していく必要がある．さらに，透水層が層状（例えば，上が砂層，下が礫層）の場合には，透水性の違いによるダイナミクスによって破壊の進行性が強く影響されると考えられる．

(2) パイピング現象解明に向けた要素の抽出

パイピング現象を解明するためには，孔の維持機構，および，浸透水が孔へ湧出する現象と孔の伸展に伴う土砂の供給現象，さらに，孔の中での土砂の流送過程を明らかにする必要がある．

まず，孔の維持機構について考える．砂質土中の孔の維持には，アーチング現象が鍵を握る．アーチング現象発生時には，砂粒子の間に働く力でアーチ構造が成立，維持される必要がある．堤外地水位変化などによって地盤内でも非定常な変化が起きているなかで砂が流送されている孔を想定し，アーチ構造が維持できる条件の成立は考えにくい．これに対し，上層に粘性土，下層に砂質土となる境界が存在する場を想定すれば，ルーフィングのように空洞が広がることが考えられる．このような境界で起こる現象は，樋管・樋門にそって空洞が広がる現象と類似している．

次に，孔への水の湧出現象と孔の伸展に伴う土砂の供給現象について考える．パイピングの発達時には，孔の伸展領域にある土砂が孔の中へ供給される．当然その土砂を孔の外へ流送するだけの水量が孔へ供給される必要があるため，孔の中の流速や圧力の影響を受けて孔周辺の浸透水が湧出する現象を捉える必要がある．また，水の湧出に伴う土砂の供給機構を考えれば，どの領域に穴が拡大するかが明確になる．なお，孔への集水領域が存在するとなると，その領域内に複数のパイピングは発達しえないため，パイピングの発生間隔を決める機構との関わりが示唆される．

最後に，砂の流送過程について考える．砂の運動形態を掃流，浮遊ととらえれば移動床水理学の知見を応用し流送量については評価できる可能性がある．ただし，孔の中での土砂の流送を取り扱うため，砂が一部に留まり孔をふさぐ“目詰まり現象”と，目詰まりによって孔の水流が一時的に止まることで生じる「目詰まり箇所前後の圧力差」によって孔をふさいだ土砂がいっきに流送される“目詰まり解消現象”の解明も重要となる．なお，上述した水の湧出，土砂の供給に加え土砂の流送過程が明確にすることは，孔の大きさと間隔，流量，流砂量の関係の機構解明に寄与すると推察される．

5．技術的課題とその取り組みの方向性

(1) 危険箇所を判別するための根幹となる力学的解釈

現行の安全性照査では，矢部川の破堤事例のように一出水で変状発生から破堤まで一気に進展する箇所とその途中で留まる箇所を区別することができない．この判別の根幹となる技術として，変状発生からその進展を記述する力学モデル（進行性破壊モデル）が必要と位置づけ，機構解明・記述・モデル化のための実験・現地調査・理論的取扱いの課題について整理した．

まず，4. で示しているが堤体内の地盤変位や土粒子の流送などの挙動解釈のために以下のことが必要と考える．①既存の有効応力の概念の拡張，②水みちがチャンネリングして連通する条件の把握，③速度勾配が支配的となり非ダルシー的な幅広いレイノルズ数・多様な流れの場の実態の把握である．また，現状の解析ではどの様に堤体に亀裂が入りその後どの様に水が流れるかというモデルが無いことから，④微小変形理論などに基づく土の応力～歪み関係と粒子理論による流体力～流送量の融合した取り扱いや，⑤堤体内浸透による変形の進展・連鎖状況の挙動把握が必要である．さらに，⑥粗粒土と細粒土や樋門と地盤など透水性が大きく異なる境界面の挙動把握や，⑥鉛直二次元から三次元への拡張(外水位の時空間分布と堤防の形状，土質構造分布の検討)等が課題である．

特に，浸透水，土粒子の流動に関して，固定された土粒子の中を流れる透水速度とパイピングのように土粒子が流動する侵食速度の双方を把握することが進行性破壊のモデル化で重要であり，土粒子が移動する条件やパイピングが進展する条件を規定する速度を決める必要がある。しかし，現時点ではこれらを直接計測することは難しく，計測技術の開発が不可欠である．

次に，前述した地盤変位や土粒子の流送挙動の解釈を踏まえ，進行性破壊を扱える合理的かつ実務的なモデルとして以下のような課題が考えられる．①地盤におけるバラツキの大きさや地形の複雑さを考えた場合のモデル化のスケールの選択，②浸潤による土の強度低下（粘性土よりもシルト質土で顕著）を考慮した地盤の空間的抵抗力のモデル化や水の作用力のモデル化である．これらの進行性破壊モデルにおけるパラメータが，実験や現場で得られるデータで適切にキャリブレーション可能とすることが重要である．これら進行性破壊の解釈やモデル化のためには実験的研究が主要となるが，前述したが実験における速度の計測，圧力分布の計測を精度よく行うことが課題となる．また，実験における相似則の確認も重要である．これら力学的解釈を踏まえた進行性破壊モデルを実堤防へ適用するために，礫質土や粘性土など幅広い土質材料へのモデルの適用性を検証する必要がある．

さらに，得られた進行性破壊メカニズムを考慮した堤防決壊抑制のための対策工法，施工技術の開発も重要である．

一方，河床勾配が大きい個所，河道形状が複雑な箇所や水衝部においては，洪水流による堤防への直接侵食による堤防破壊の危険性も合わせて考える必要がある．堤防表法や基礎が侵食，洗掘を受けると，堤体，基盤に浸透しやすくなるため，進行性破壊を解釈しモデル化するためには，浸透流と侵食の相互作用についても検討していく必要があるだろう．

(2) 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

堤防の土質については，ボーリング調査等により把握する方法が一般的であるため，空間的に疎な情報が取得されている状況にある．あわせて，堤防地盤においては土質の不均質性が無視できないほど大きい．そのため，(1)において仮に進行性破壊を取り扱える精緻なモデルが得られたとしても，調査データの制約から危険箇所の特定が困難となることが考えられる．この課題を正面から取り扱うことが重要であり，これが最重要課題の一つと位置づけるべきと考えられる．

この課題に対するアプローチとして，土質の面的調査手法，堤防挙動の観測結果から間接的に土質を推定する手法，堤防が経験した外力の大きさとそれに対する被災・無被災堤防の情報などから堤防性能を推定する技術について整理した．

地盤特性の空間分布の把握，堤防形状の把握，バラツキや疎なデータを踏まえた統計的・力学的取り扱いについて以下に示す．

地盤特性の空間分布の把握にあたっては，以下の点を明示することが不可欠である．①物理探査などの面的な調査技術とボーリング調査による点での詳細調査との組合せによる調査技術の特徴と分解能等の性能，②(1)における研究成果に基づいた危険箇所抽出のための地盤要件とそれを設定した場合の弱部の面的詳細調査法の策定，③要注意地形や被災箇所，埋設構造物など危険箇所の不均質性を定性的に把握する方策，である

堤防形状の把握には，航空LP，UAV，MMSによる面的な地形調査を経年的に実施することにより堤防変状を把握し危険箇所の推定を行うことなどが考えられる．

疎な地盤調査データの補間技術の開発も必要である．例えば，①地盤内流速の計測より透水係数の推定や実績水位と被災・変状履歴からのせん断強度などの地盤強度を逆推定，②堤体内水位・含水率などの多点連続観測や三次元的な浸透水流況観測，③堤防表面の亀裂などの経年変化の長期観測による地盤の空間分布・地盤特性の逆推定，④地盤データのバラツキを統計的に考慮し被災危険度評価を目的とする信頼性解析による危険箇所のスクリーニングである．スクリーニングにあたっては，洪水による堤防への直接侵食に対する影響因子も考慮することも必要と考える．

(3) 経験的知見・技術の集積・体系化

(1)，(2)は，その開発に相当の時間を要するが，その間にも現場では持てる情報をもとに経験知を総動員し，技術的判断を行い，堤防の強化を進めていくことが求められている．このような取組みを，(1)，(2)を補完するような経験的技術として高めていく取組みを三つ目の技術的課題として位置づけた．

例えば，堤体・基盤土層，治水地形分類などの地盤条件，動水勾配などの外力条件，のり面勾配などの形状条件といった様々な堤防に関する基礎情報をもとに，縦断的に堤防の特徴を把握し，技術的判断に活用することも考えられる．このような取組みは，線状構造物で不均質性が大きい河川堤防の特徴を考慮した上で，力学的アプローチを補完し，現場で「判断」するための技術と言える．

このような取組みを，経験的技術として高めていく方向性として，基礎情報となる出水直後の被災・変状の記録を徹底すること，それに基づく経験的知見の検証と教訓の活用のための検討を行うこと，それらの検討を広く行える場の設置の三つを考えた．

まず，出水直後の被災・変状の記録であるが，記録・蓄積にとどまることなく，経験水位・被災実績に基づく信頼性解析の実施などによるモデルの検証・再調整など，経験的知見の検証と教訓の活用につなげることが重要で

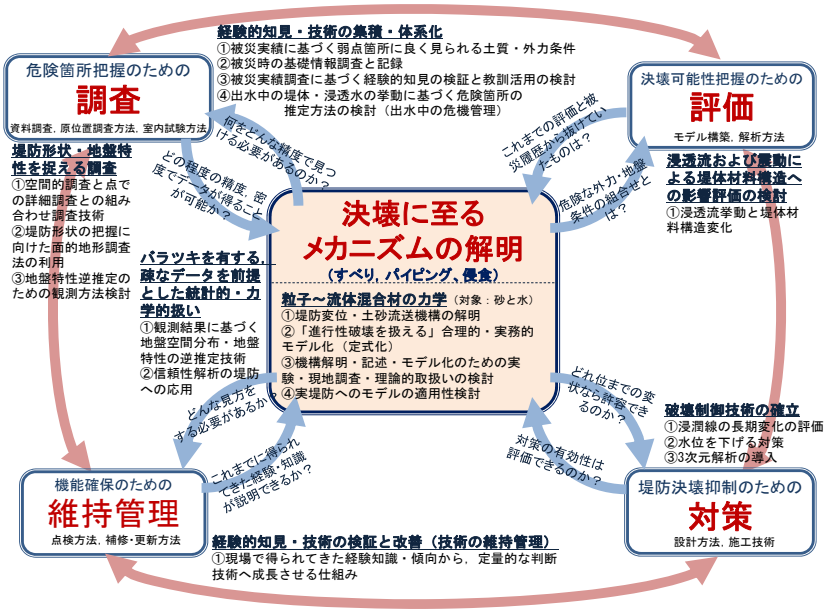


図-3 堤防破壊現象の解明とその対策に関するアカデミック・リサーチ・マップ

ある．

被災の現象解明のための調査を実施し，洪水時の水位の分布や河道の状況と被災の関係，噴砂・湧水口のできる条件の解明，ゆるみや透水性などの経年変化であるいわゆる「劣化」の定量的把握など新たな視点からの検証も必要である．あわせて，出水中の間隙水圧分布や堤体表面の変位をもとに危険箇所を推定することにも挑戦すべきである．物理探査では基盤に存在する50cm程度の薄い砂層を検出することは困難であることを考えると，レーザースキャナ等により被覆土層の盤ぶくれを直接測定するなどの取組みが考えられる．なお，堤防の場所によって調査密度に差があることも十分~~を~~考慮することも必要である．

これらの取組みと並行して，経験的知見に対してその検証と改善を行い，いわゆる堤防工学として定量的な判断技術として体系化させる仕組みの構築が必要である．その一つとして，データ・知見の共有・鍛錬の場の整備（学会WGなど）が考えられる．

６．まとめ

最後に，すべての核となる“決壊に至るメカニズム解明”と，“危険箇所把握のための調査”，“決壊可能性把握のための評価”，“堤防機能確保のための維持管理”，“堤防決壊抑制のための対策”それぞれとの関わりを示し，5．で示した項目を中心にWGで議論してきた技術課題の要素をアカデミック・リサーチ・マップ(ARM)として**図-3**に整理する．優先度や解決に必要な時間を踏まえ，本ARMの各要素を計画的に解決していくことで，その時々での成果を最大限に生かした効率的な堤防管理の実現が期待される．なお，本ARMは今後の研究開発の進展等を踏まえ、随時見直しを行うものである．あわせて，本ARMを示すことで，各課題の解決に向けて様々な研究者がかかわっていくことを期待したい．

謝辞：本WGの活動の一部は，公益財団法人河川財団からの助成を受けて行ったものである．記して謝意を表す．

参考文献

1) 矢部川堤防調査委員会: 矢部川堤防調査委員会報告書, http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/site_files/file/torikumi/01-plan_course/tyosa/saisyu/houkokusyo.pdf, 2013..
2) 秋葉俊一，吉田直人，石原雅規，佐々木哲也: 河川堤防の進行性破壊とのり尻付近の局所動水勾配の関係に関する解析的検討，第2回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム，pp.41-44，2014
3) 建設省土木研究所材料施工部土質研究室：堤防基礎地盤のパイピング破壊に関する模型実験，土木研究所資料第3399号，1996.
4) 久楽勝行・吉岡淳・佐藤正博：水平方向浸透流下における砂地盤のﾊﾟｲﾋﾟﾝｸﾞについて，第20 回土質工学研究発表会,pp.1483～1484, 1985.
5) 土木学会水工学委員会・河川部会： 2013年度・河川技術に関するシンポジウム OPS1：堤防浸透破壊 ～目に見えない堤体・基盤内からの破壊～，http://committees.jsce.or.jp/hydraulic01/activities，2013.
6) 齊藤啓，前田健一，李桃卿，山口敦志：透水性基盤のパイピングとすべりに着目した河川堤防の安定性，第2回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム委員会報告・講演概要集，土木学会，pp. 23-26，2014.

(2015. 4. 3受付)

◆掲載資料について

総説「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」の内容をより深掘りして理解する資料として，次頁以降に全 10 回の連携 WG 会議で用いた資料・議事録および「河川技術に関するシンポジウム」での WG 活動発表資料（OPS オーガナイズドポスターセッション資料）を掲載した.

総説の各章節の内容と関係の深い会議や発表資料は下記のとおりである.

総説の章・節	会議・発表資料
1 章	第 1 回，2013 年発表資料
2 章	2013 年発表資料
3 章(1)	第 2 回
3 章(2)	第 2 回，第 3 回
4 章	第 4 回，第 5 回
5 章	第 6～9 回，2015 年発表資料
6 章(図-3)	第 10 回，2015 年発表資料

なお，以降に掲載する各資料は，その後の議論などの結果・成果・認識の変化等と整合するように修正は加えておらず，打合せ実施当時のものをそのまま掲載している．そのため，一部において資料間の不整合や認識のずれ，誤りなどが散見されると思われる．しかしながら，産学官の技術者・研究者が一堂に会し，堤防に関する技術について，各自の経験を開陳し，その上で率直に意見交換や議論を行った記録を含む本資料は，今後も継続して堤防技術について検討していく上で参考になると期待している.

本資料の利用にあたっては，上記のような長所短所に配慮されたい.

地盤工学委員会堤防小委員会「浸食・浸透破壊・洗掘 WG」＋水工学委員会河川部会「堤防 WG」

第 1 回合同会議　議事録（案）

日　時　：　2013 年 2 月 18 日（月）10:00～12:00

場　所　：　（社）土木学会D会議室

出席者　：　[浸食・浸透破壊・洗掘 WG]

前田，坂本，（小俣），杉井，石田，丹下，竹下，藤本，與田，（服部）

[堤防 WG]

服部，松田，小俣，内田，阿部，松本，溝口，宮武，三輪

［オブザーバー］

岡村，泉，小林，長田　　（敬称略）

■議題

1. WG メンバー紹介
2. 両 WG の活動概要
3. WG 連携活動に関する議論
4. 活動の仕方・スケジュール他

■配布資料

資料 1　WG メンバー表

資料 2　土木学会地盤工学委員会堤防小委員会 WG の提案

資料 3-1　2012 年度河川技術に関するシンポジウム：堤防関連セッション報告書

資料 3-2　堤防 WG 前回打合せ議事録

資料-4　WG 連携活動案～議論を始めるたたき台として～

■議事内容

○課題認識について

・昨年、矢部川ではパイピングが原因とみられる破堤災害が発生したが、この事例をみても浸透破壊現象は十分解明されていないのではないか。被災した箇所と被災しなかった箇所の違いについて、浸透破壊に関する既往の手法では必ずしも明快に説明ができていない部分がある。

・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。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。研究者・技術者によってバラバラでは。

・パイピング現象を実際に確認した事例はほとんどないのではないか。

・水工学では基礎方程式に基づいて現象をモデル化して説明しようとしてきた。よって立つ基礎式（現象の基本的な力学的表記法）があるので理解はしやすいが、それを現場に適応するにあたってその枠にとらわれやすく実現象と大きく外れることがあるのでは。地盤工学ではまず現場から実現象を理解することから始め、それに適応した土質試験法とモデル化を行うことを重

視しているので実現象と乖離することはないが、現象に応じて土質試験法を使い分けるなどよって立つ基礎式（現象の基本的な力学的表記法）が分かりにくいのでは。　→　こうした両分野の特質をうまく組み合わせて、現象の理解、計算できることとできないこと、モデルの整理を行うことが重要。

・モデル化はその当時の計測技術、計算技術の水準に応じて簡略化・精緻化の度合いが変わってよいのでは。たとえば、掃流力で掃流砂量を算定するという枠組みの流砂量式も、よって立つ基礎式に立ち返って違う枠組みでモデル化することもできる。それが今日的な研究の一つのあり方なのでは。
・縮尺模型実験では、スケール効果により実際の現象を再現できない場合もあるのではないか。現場での起こっていることをより的確に理解し、モデル化していく上で、実大実験の果たす役割についても見極めることが重要。
・過去の浸透破壊の典型的な見方にとらわれず、各人が見てきた様々な現象を改めて収集整理することも、現場で起こっていることをより的確に理解していく上で重要。
・以上は基礎的なことであるが、実際の堤防管理、補強などにも十分に役立つ知見となり得る。
・たとえば、現在の一般的な浸透破壊の考え方に基づいて、種々の対策や維持管理が行われているが、改めてそうした現象の理解、モデル適用で安全が十分に確保されるか、工学・技術としてしっかり説明したい。
・具体例では、貴志川では、ウェルドレーン工法と称する減圧工法が採用されているが、のり先に深いドレーンを設置し、その周辺で浸透流速が増加しうる。こうした一つの対策によって他の現象を誘発することはないのか、対策工が当初想定している機能が低下・喪失することで対策実施前より安全性が低下することはないのか。こうした疑問に対する検討にも当然役立つ。

○今後の活動について

・パイピングに代表される浸透破壊現象を中心に、浸透を伴う洗掘や浸食といった現象も含めて課題抽出や今後の方向性に関する検討を行う。
・両 WG が連携することによって、水工学と地盤工学の両面からのアプローチが可能になり、新たな切り口による提案が生まれることが期待される。
・次回以降で、様々な現象について、「現象把握レベル」と「予測・評価レベル」の２つの軸で整理してみる。
・実際の破壊事例を対象に、どのように現象を理解・認識しているのかを各メンバーが意見を出し合い、出された意見を全員で共有し現象把握レベルと課題を整理する（たとえば、一つのホワイトボードに貼り付けていく方法も有効と考えられる）。
・その中で、どのような調査方法や計測方法が、どのような現象を捉えることができるのか、できないのかなど、予測・評価レベルについて整理してみる。また、相似則を含む実験方法(大規模・小型模型・遠心力載荷等)などについても意見を出し合ってみる。
・合同 WG の名称を考える。
・各 WG でサブリーダーを選任する。（浸食・浸透破壊・洗掘 WG：？，堤防 WG：阿部）

○次回の予定

・４月中に開催する方向で日程調整する。

以上

WG 連携活動案　～議論を始めるたたき台として～

・WG 活動の基本方針（案）

（１）WG 構成メンバーの専門性・特技を活かす

（２）全員参加の健全な批評と議論―予断を持たずに―⇒それをまとめて WG 成果に!!

（３）技術課題の全体像を描く⇒調査～維持管理まで意識した議論

⇒資料 3-1 図-8 堤防に関する技術課題の全体像

・WG 活動としての反映の具体案

【事例を下敷きにした議論】現場の事例。業務で見てきたこと。実験で見たこと。

・例えば

堰の被災→浸透による本体下の空洞化の可能性を検討→最後までつめられなかったこと

矢部川破堤→浸透破壊の可能性について動水勾配で検討

【事例を掘り下げて類型化⇒技術開発の方向性】

・基盤とする情報

実務ベースから：単にマニュアルの羅列でなく、その運用で加味した「工夫」「妥協」

研究ベースから：これまでの現象の捉え方、力学的取り扱い、単純化

⇒地盤・水の分野間の文化（考え方の慣習）の比較

例えば、

魚の慣習：地表面上での流送量と収支、モグラの慣習：地表下の構造体としての変位・変形

⇒浸透破壊（パイピング）：表面なの？内部なの？

・よく見るパイピングの模式図（図-1）

矢部川：幅 1m 程度で堤防が溝状に崩壊→モグラ孔のようにパイプができたから？

孔端部の砂面から砂粒が動いて流れ出るということ？

・学生の頃に行った浸透破壊の実験の記憶

矢板周りの浸透破壊の実験：表面からではなかった（図-2）

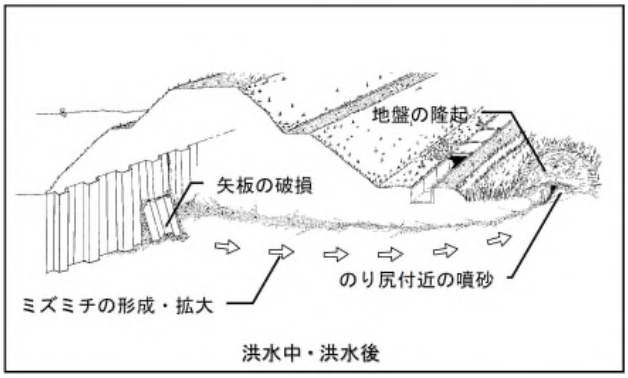


図-1

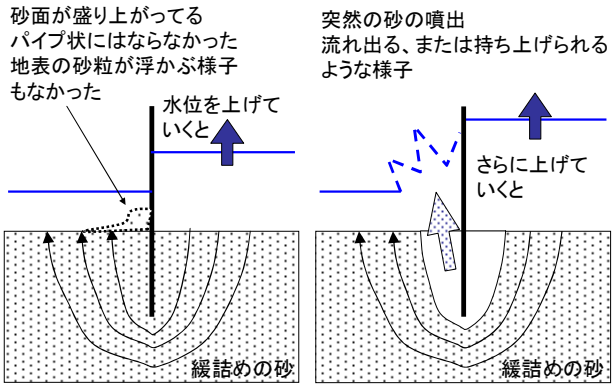


図-2

■現象把握レベルの類型化

・場の特徴

河床の変動（砂面上の砂粒の流送）

法覆工・堰・床止（不透過な板状部材）

石積み・ブロック、礫層（ポーラスな層状材）

・浸透流、表面流の状況

・土砂の移動形態

砂面での砂粒単位での移動転動：滑動：浮き上がり

砂層内（間隙）での土粒子の流送（抜け落ち）

土粒子の構造体の変形

（土粒子の相対的な配置・接触状況の変化→マクロには空隙、粒度分布の変化）

土塊のスケールでの変形：マスとしての変位

■予測・評価レベルの類型化

予測・評価できる・できない（簡易的、定性的などカテゴリーがあってもよい）

■総合的な類型マップ

・どういう区分で現象を捉えているか？

・それぞれがどの水準に達しているか？

・それぞれの処方箋（技術開発の方向性）

		現象の理解		
		主たる機構が絞り込めている	プロセスが定性的に分かっている	概念的な記述に留まる
予測・評価のレベル	予測・評価できる	現象が分かって、ある予測ができる ⇒実務適用段階：調査・試験・受注できる仕様化		モデルはあるものの、現象理解があいまい・未整理 ⇒知ったかぶりになっていないか？基礎的実験・調査で再検証
	手法はあるものの与える土質条件等で大きく結果が異なる	土質調査手法の開発が実用化のネック ⇒調査の手法・測点密度に関する検討		
	予測・評価できない	現象はある程度捉えられているが、予測モデルにつながらない ⇒計測機器の改善、大規模実験		前人未到 ⇒初歩的な再現実験から手をつける、綿密な被災事例調査が重要

こういった整理を WG での議論をもとに作ってみる。

地盤工学委員会堤防小委員会「浸食・浸透破壊・洗掘 WG」＋水工学委員会河川部会「堤防 WG」

第 2 回合同会議　議事録（案）

日　時　：　2013 年 5 月 9 日（木）15:00～19:00
場　所　：　（社）土木学会Ｅ会議室
出席者　：　[浸食・浸透破壊・洗掘 WG]
前田，坂本，杉井，石田，丹下，竹下，藤本，與田，（服部）
[堤防 WG]
服部，松田，石原（代理出席），阿部，松本，三輪
［オブザーバー］
泉，長田，森　（敬称略）

■議題

１．前回議事録確認
２．各メンバーからの資料説明
３．資料にもとづく整理と集約
４．河川シンポジウム・堤防関連 0PS の案について
５．次回の合同会議について
・　次回の議題と開催日時

■配布資料

・前回議事録
・WG 連携活動案～議論を始めるたたき台として～（前回資料）
・各メンバーからの資料
・６／６河川シンポ：堤防関連 OPS・PS 案

■議事内容

１．浸透及び浸透破壊に係る課題に関する意見交換

各メンバーから浸透及び浸透破壊現象に係る事例の紹介や問題意識に関する発言があり、引き続いて質疑応答や意見交換を行った。

1）森 啓年／浸透による堤防決壊　～長良川，矢部川など～

・土研で過去に実施した浸透実験では、小規模な崩壊は起きるが、なかなか大規模な破壊には至らない。
・どのように、なぜ、小規模の被災が大規模な被災に至るのかがわかっていない。
・現状では、小規模な被災でも全力をもって対応しているが、破壊が進行する条件がわかれば、対応すべき被災の優先順位付けが可能になる。
・粒子（SPH）法によって閾値が求められないかと考えているが、モデル化やパラメータ設定に課題がある。

2）阿部 知之／噴砂を伴う漏水発生事例

・出水時に堤内地に大きなガマが発生した事例についての紹介。
・行き止まり型地盤となっていたことが原因の一つであるが、堤内地の被覆土層の厚さが 5m もあったのにかかわらずボイリング（噴砂）が生じたことが特徴的である。
・噴砂箇所を開削してみたところ、被覆土層は所々に砂質土が介在し全体に不均質であることが確認された他、表層近くに大きな空洞や水ミチが確認された。
・この種の被災を予測することは難しく、どうすれば事前に見つけ出せるかが大きな課題である。

3）松本 健作／堤体・基盤漏水とボイリング
・同じ地層内でも場所によって透水性は異なる。
・漏水やボイリングについて検討するには、収集事例や観測事実にもとづいた考察が必須。
・まずは、当たりをつけるための一次診断の技術が必要である。
・そのためには、洪水履歴の情報が重要である。
・繰り返し洪水を受けると堤防はどうなるかについての分析も必要ではないか。

4）服部 敦／ガマから砂が流出するような流速で湧水が生じる条件は、パイピングを発達・進行という側面から考える上で重要？
・パイピング孔の中で砂を流送するだけの流速が生じるのか、疑問に思っている。
・試算では４オーダーも異なる非常に小さな流速しか生じない。
・なぜ、パイピングが進行するか、流速だけで説明することは難しい。
・砂層から細粒分だけが吸い出される現象とパイピングとの違いは何か。
・室内実験では土粒子の動きや湧水量に脈動的な現象がみられる。砂粒子の移動とともにパイピング孔内で砂粒子が滞留し、その後浸透圧が高まり再び流送される、といった現象が繰り返し起きているのではないか。

5）服部 敦／砂床河川に多い粘着性を有する河岸：不飽和な土への浸透で粘着力が低下、土中内の応力分布変化が耐侵食力を変える？
・粘着性を有する河岸材料の侵食現象については古くから研究されているが、一般的な侵食限界流速や侵食速度の評価式はなく、まだ研究段階である。
・侵食限界流速は、土の引張強度との相関があることは分かっているが、不飽和土の強度が飽和度とともに変化することなどは考慮していない。
・侵食試験を行うと、侵食面は平坦でなく必ず凹凸ができる。侵食は小さな土塊が突然離脱するようにして進行し、土塊の大きさは土質によって異なることが確認されている。

6）長田 仁／平成 24 年九州北部豪雨における矢部川の堤防決壊
・矢部川堤防の決壊について、破堤メカニズムは分かったが、他にも破堤箇所のような場所があるかどうかを見つけ出すことは難しいと考えており、行政的に大きなニーズとなっている。
・物理探査では 50cm 程度の薄い砂層を検出できる精度はない。
・ボイリングが発生する前に地盤が浮き上がる現象はよく知られているので、地表面の動きをレーザースキャナ等で検出する方法も考えられる。
・局所的な地下水の流れを把握することも重要である。

7）溝口 敦子／刈谷田川，五十嵐川等越流破堤事例

・刈谷田川と五十嵐川等越流破堤事例については，複合要因とされる場合もあり，越流破堤に至った決定的要因は不明なことが多い.
・解析等を用いても，越流破堤を起こす特定の場所等を予測することはまだ困難である.
・破堤過程等の特徴について，数値解析，各種実験で検討されつつあるが，詳細を検討しても現地にどう生かせるかという点を考えると，破堤過程を大きく変えるポイント等を知る定性的な検討でも，現時点では十分であると考える.

8）竹下 祐二／堤防表層地盤における浸透特性値の原位置計測

・堤防表層地盤の浸透特性を精度よく把握するための試みの紹介。
・挿入型水中水分量計を併用した原位置定水位透水試験により、現場飽和透水係数・現場飽和体積含水率の算定と不飽和浸透特性値の推定が可能である。
・地中レーダーで wetting front の広がりをモニタリングすることは可能である。
・降雨の前後に計測して誘電率の変化を捉えれば、土質を判別できる可能性もある。

9）與田 敏昭／浸透に対する安全性照査方法：降雨のみによる浸透破壊現象について（本当に危険なのか？）

・現行の浸透に対する安全性照査の問題点として、降雨だけで堤体内の浸潤面が上昇し、すべり安全率が NG になる場合がある。
・このような箇所での堤防強化の必要性については違和感を持っている。

10）與田 敏昭／浸透に対する安全性照査：破壊の進行性を考慮した上で現状の照査基準の妥当性について

・現行の浸透に対する安全性照査では、すべり破壊及び浸透破壊については、その破壊が進行して破堤に至るかという点での整理はされていない。
・堤防断面に余裕があるところでのすべり破壊や、パイピング破壊については、破壊の進行性を考慮して堤防強化の必要性を判断すべきではないか。
・これについては、堤防の本来あるべき断面の考え方にも関わってくる問題である。

11）與田 敏昭／模型実験：堤体の表層締固めが堤体内浸透特性に与える影響

・小型模型堤防を用いた浸透実験を行ったところ、のり面表層の締固め状態や堤体土の異方性が堤体の浸透特性に大きな影響を及ぼすことがわかった。
・実際の堤防においても、現在の土質調査方法では、表層の締固め状況や堤体材料の透水異方性を把握することはできないため、洪水時の浸透状況を正しく評価できていない可能性がある。

12）藤本 弘之／土堤防の陥没

・ガリ侵食や玉石の存在により堤体の一部に陥没が発生した事例の紹介。
・事例１は、降雨による表流水が集中しやすい箇所で、モグラ穴が侵食を助長し、次第に下方に空洞が拡大し、陥没に至った事例である。
・事例２は、堤体直下に玉石層が存在しており、豪雨時にその空隙に上方の堤体土が流入して空洞が発生し、陥没に至った事例である。

・陥没が発生する箇所は、いくつか共通する条件があると想定されるため、その条件を整理して点検や補修を行うことにより、効率的な堤防管理が可能となる。

13）坂本 淳一／中小河川のカミソリ堤

・中小河川のカミソリ堤で、天井川であるが、近年は被災していない河川がある。
・浸透に対する安全性照査でもすべりで OUT になっており、住民も不安に思っている。
・なぜ被災が生じないかはわかっていないが、洪水継続時間が短いことが一つの要因として考えられる。
・平常時でも河道内に流水が維持されていることから、基礎地盤の水理構造の確認が必要ではないか。

14）前田 健一／浸透破壊：例えば矢部川，実物大実験

・ため池堤体を模擬した実物大の降雨浸透実験において、土塊のすべりと浸透破壊が交互かつ断続的に生じるような現象がみられた。
・着目している現象のスケール（フォーカススケール）と現象を考えているスケール（現象把握スケール）とは一致しているのか？
・スケールの大きさによって考慮すべき力やモデル、解析手法がどのように変化するかについて整理を試みたが、容易ではないことがわかった。

15）前田 健一／弱部を探す間隙水，間隙空気：東海豪雨，台風 15 号，福島・新潟豪雨（2011），模型実験

・地中の間隙水や間隙空気が噴出する現象について、弱部とは潜在的なものか、誘導発展するものか、間隙空気による堤体の劣化はあるのか、などについて疑問をもっている。

16）石田 正利／新潟・福島豪雨　信濃川左岸エアブロー事例

・信濃川において洪水のピークが過ぎてから河川水位が低下する際に、表のり付近の水面下でエアブロー（噴気）が確認された。また、その 20 後に再び現地に行ったところ、エアブローが確認された地点で噴気孔と思われるクレーター状の孔が確認された。
・原因としては、河川水位の上昇とともに堤体内に押し込められた空気が、水位の低下に伴って亀裂等の弱部を通って地表に噴き出したものと捉えている。
・エアブローが堤防の安全性にどのような影響を及ぼすか、疑問に思っている。

17）石田 正利／台風 15 号豪雨　越流堤ライニング破損

・新川洗堰越流堤において越流時にライニングの浮き上がりが発生した。
・庄内川側道路端部からのエアブローが確認された。
・堤体内の間隙空気圧か、越流水によるアップリフトが原因と考えている。

18）石原 雅規／堤体の浸透破壊に関する大型模型実験，堤内基盤排水工法に関する遠心模型実験（堤高 10m）

・堤体の浸透破壊に関する堤高 3m の大型模型実験の紹介。
・湛水位を一定として長時間経過すると、細粒分含有率が 10%程度の砂質土では、浸潤面以下ののり面がどろどろと崩れ始める。また、締固め度が高いほうが破壊までに要する時間が長

くなる。
・細粒分が 30%程度の砂質土の場合は、水圧でのり面全体が側方に押し出されるように変形し、背後の天端付近の土が陥没した。
・粘性土の場合は、非常に長期間（約 40 日）経過した後、すべり破壊に近い形態で崩壊した。
・堤体の土質によって崩壊の形態が異なる原因についてはわかっていない。
・遠心模型実験は、パイピング（盤ぶくれ）の対策工として。透水トレンチと排水機能付き矢板を取り上げ、その効果を確認するために実施した。遠心力場は 50G とし、堤高 10m に相当するモデルを作製した。この実験により、それぞれの対策工の効果の違いが確認できた。

19）杉井 俊夫／水平流れが卓越する場合の限界動水勾配，限界流速？
・水平方向の限界動水勾配を調べる実験を行ったところ、鉛直方向の限界動水勾配と比べて、かなり小さな値を示す。
・浸透流下での土粒子の移動限界を動水勾配で考えるか、流速で考えるか？
・流速で考えると、粒子レベルで考えることができる。
・土中の流速は、間隙径の大きさと間隙の連続性の程度で異なるのではないか。

２．河川シンポジウムにおける堤防関連 OPS の企画について

服部リーダーより提示された OPS の企画案をもとに、今後準備を進めることになった。
概要は以下のとおり。

・OPS タイトル：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
・司会進行：服部
・発表・討議メンバー（案）： 矢部川破堤に関する論文の発表者
土研・佐々木上席
名工大・前田先生
WG 副リーダー・阿部

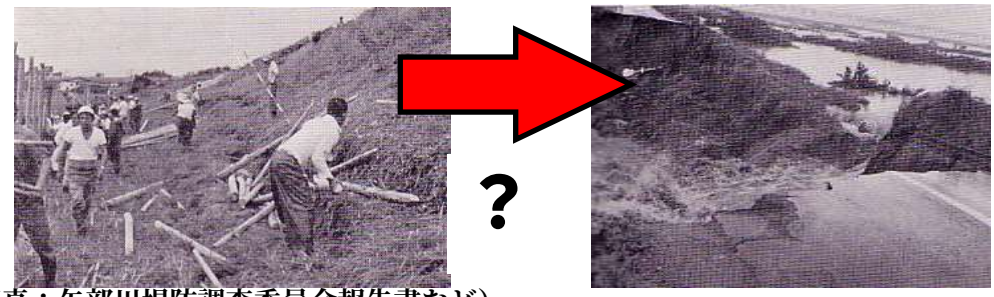
３．次回の予定

・7 月上旬に開催する方向で日程調整する。

以上

1.「浸透による堤防決壊　～長良川、矢部川など～」

長良川（写真：岐阜県 HP）



矢部川（写真：矢部川堤防調査委員会報告書など）

２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

長良川はのり面すべり、矢部川はパイピングによる堤防決壊。

どのように、なぜ、小被災（すべり・ガマ）が大被災（堤防決壊）に至るのか？

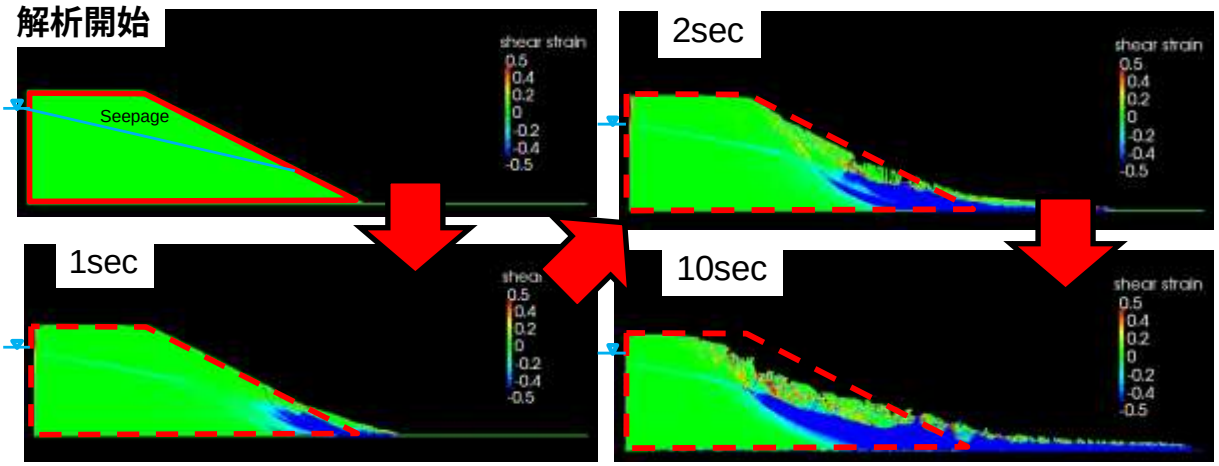
３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

・小さな現象も全力をもって対応しているのが現状

・破壊が進行する条件が分かれば、対応すべき被災の優先順位付ができ、効率的に堤防強化が可能

・進行する破壊を再現できる解析手法があれば、その条件が明らかにできるのでは？

粒子（ＳＰＨ）法による河川堤防の大被災の再現可能？



・大変形時の土の構成則、間隙水の挙動が悩ましい（モデル化の課題？）

・ＳＰＨ法における土水連成方法が悩ましい（手法の課題？）

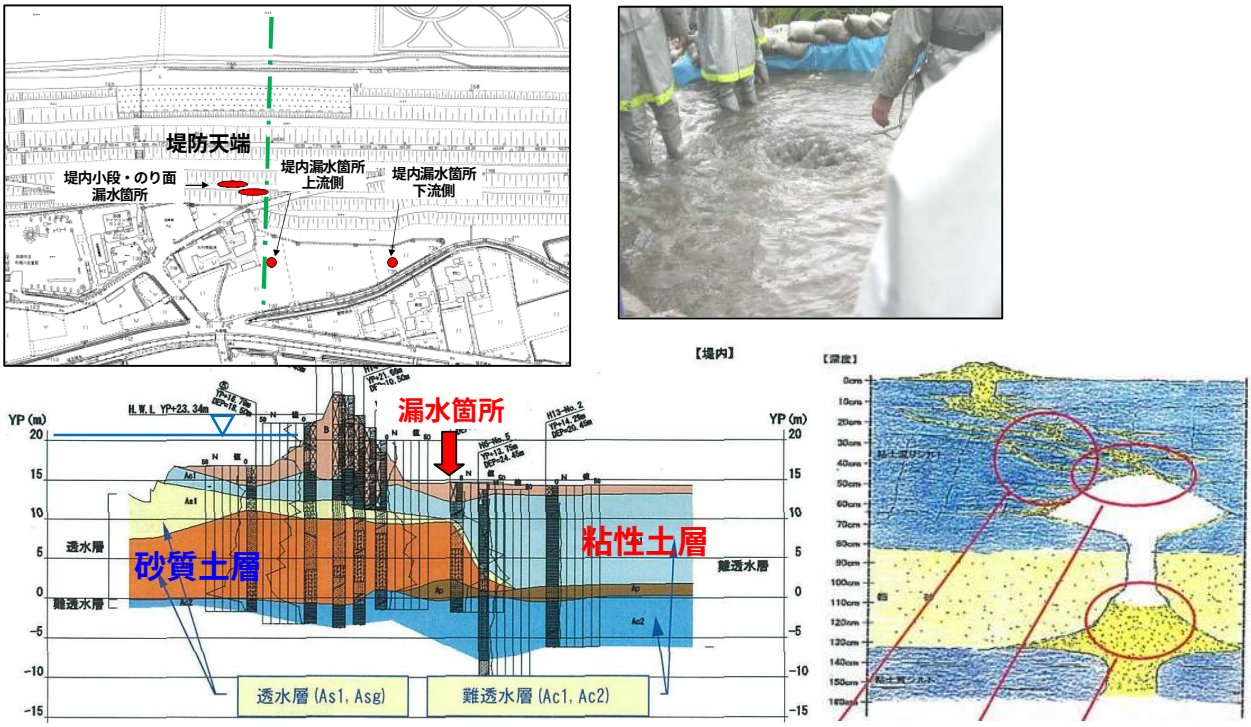
１．「実事例，実物大実験，模型実験」の名称

噴砂を伴う漏水発生事例

２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

対象箇所では、堤防下に分布する透水層の厚さが堤内地では急激に薄くなっており、いわゆる“行き止まり型地盤”を形成している。そのため、河川水位の上昇とともに裏のり尻付近で透水層内の水圧が高まったことが漏水要因の一つと考えられた。

裏のり尻付近における透水層上位の被覆土層の厚さは5m程度であり、盤ぶくれが発生する可能性は小さいと考えられた。一方、漏水箇所を開削して噴砂跡を調べたところ、砂質土が脈状あるいは層状に存在する状況が確認された他、噴砂跡が空洞化している部分やその中に噴砂が再堆積している状況、さらに噴砂孔の跡がさらに深部に続いている状況などが観察された。これより、被覆土層の内部は、砂質土の不規則な混入や人為的な撹乱の影響等により全体に不均質な状態にあり、そのために被圧水が水ミチとなる弱部を通って地表に浸出し、その後激しい漏水とともに砂粒子の流出が起こったものと推察された。



漏水箇所の開削断面スケッチ

３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

上記事例のような現象を予測するとすれば、堤防横断方向の土質構造や、堤内地の表層部（被覆土層）の土質状況等を詳細に把握する必要がある。一方で、パイピングに対する安全性について、被覆土層の不均質性を考慮して評価することは現状では難しく、事例の収集・分析やモニタリングの活用などにより、新たな評価手法の検討が必要と考えられる。

また、漏水や噴砂から破堤に至るプロセスについては不明な点が多い。模型実験による知見の蓄積や、進行性破壊を考慮できる新たな解析手法の導入などが今後の課題と考えられる。

１．「実事例，実物大実験，模型実験」の名称

堤体・基盤漏水とボイリング

２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

透水性の変化.

透水性変化のメカニズムはさっぱり判りません.

「変化しているな」という感触はあります.

３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

収集事例と観測事実に基づいた考察が必須と考えます.

浸透性破壊まで至る事例は少ないですが，漏水やボイリングは頻発地帯が全国随所にあります.

漏水・ボイリングが浸透性破壊の先駆現象といえるかどうかは判りませんが，検討の端緒としては適した対象であると考えます.

実際に現場を管理している各河川事務所の方や堤防・構造物エキスパートの方，調査に従事・精通された方などから現場事例を収集し，且つ，選定した漏水・ボイリング頻出区間で集中的継続観測をしてはどうかと思います.

具体的な調査項目は収集事例を総括して改めて検討するのが良いと思います.

現状は，体系化まで考えず，事例を収集・俯瞰するべき状況かと思います.

よって，その予測・評価も現場毎，事例毎に大きく異なることを前提として課題・方法を検討すべきではないかと考えます.

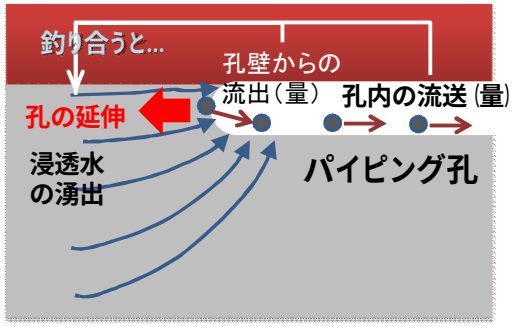
１．「実事例，実物大実験，模型実験」の名称

ガマから砂が流出するような流速で湧水が生じる条件は、パイピングを発達・進行という側面から考える上で重要？

２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

◆以下、ごくラフなオーダーを掴むための思考実験→伝統的？な考え方に沿ってパイプ状の空洞ができると仮定。孔壁から砂が流失する流速、それが空洞内に溜まらずに流送させるための流速は？

◎本来であれば、単位時間あたり（孔壁から流失する砂量）＝（空洞内の流送量）となると、パイプが埋まらずに、パイピングが進行すると想定される。しかし、両者とも評価式がないのでここでは、それらが生じる限界値を代替として、オーダー比較することとする。



- 孔壁から流失→地表の動水勾配 i で評価：i=1 のオーダーが砂の内部侵食の発生限界、その際の浸透流は砂のよくある透水係数から 10^{-3}cm/s オーダーと推算。
- 空洞内での掃流→パイプ流を想定して河川工学でよく使う限界掃流力で評価：水深や粒径などで変わるがざっと断面平均流速で 10^{1} cm/s オーダーと推算。

→ざっと 4 オーダーの流速差：この差がなにやらいろいろと考えさせられるきっかけ！！

・流量の保存則から浸透流が孔内に向かって流れが集まるかを大まかに算定すると、その範囲は孔の直径を D とすると 10^{2} D となる。

◆こうした流れが生じるかは、孔の直径、孔内の流れの抵抗則、砂層の透水係数などによって決まってくると思われる。そこを理論的に詰めるのは後回しにして、ごく簡単に幾つかの場の条件を考えてみる。

1)粘性土に挟まれた砂層であり、かつ行き止まり（矢部川破堤箇所と似た地盤構成を想定）→仮に一箇所、上の粘土層に孔が空いたらそこにすべての流れが集中。10^{2}以上から集まりやすい条件：最も危険な条件？（パイピングの孔は粘土層の直下にあり、そのため小さい穴であれば粘土が崩れないで孔が保持されると想定）

2)上記と同じだが複数の孔が空いたら？→孔の間隔が 102 以下であれば、パイピングは進行しにくい？

3)粘土層のない基盤表面まで砂の場合→孔はそこらじゅうにできるだろうし、孔の壁が崩れるのでパイピングはさらに進行しにくい？

◆以上はかなりラフなので、実態は？

◆当方にとって新しい浸透破壊（パイピング）：砂層から細粒分が流失、すると強度を失って崩壊する、というのは上記とは全く別（おそらく、細粒分であれば上記ほど大きなオーダーの流速差にならないと思われる）→どのような粒度分布（土質）、土層構造だと、伝統的 or 新たな浸透破壊になるのか？は重要な課題

◆さらに基盤の浸透破壊によって堤体が崩壊したとして、その崩壊土砂を流送できるほどの流速がどうして生じうるのかも、よくわからない。

３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

・浸透流と孔内流を組み合わせた流れ場の計算は理屈上できるであろう。

・課題は、流掃される土砂量（フラックス）を流速などの水理量と関係づけて評価できるような知見がないことか（非常に水理学的なアプローチですが）？

１．「実事例，実物大実験，模型実験」の名称

砂床河川に多い粘着性を有する河岸：不飽和な土への浸透で粘着力が低下、土中内の応力分布変化が耐侵食力を変える？

２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

・砂床河川の河岸構成材料：シルト・粘土混じりの中～細砂など、粘着性を有する堆積土。徐々に侵食を受けている河岸面は、平水時でもほぼ鉛直に切り立っている。

・河岸侵食のプロセスの一例は下図のとおり。一般に流水による侵食、不安定化した河岸の崩壊、崩壊土の流送を繰り返す。

・そのうち、今回は流水による侵食に着目。過去に河川研で高水敷から不攪乱で土を採取し侵食実験した。

・侵食限界流速は、土の引っ張り強度σ_{tb}（N/cm²）との関係として整理できた。細粒分の含有率や一軸圧縮試験などでは相関が得られなかった。同様に侵食速度も、σ_{tb}と流速との関係として整理できた（ばらつきはそれなりにありますが…。例示した図には流速を摩擦速度に換算したものです）

・この機構は、ごく概念的に、侵食面の凸部に作用する揚力が引っ張り破壊強度を超えると粘土塊が離脱するというように解釈した。それを裏付けるための地盤工学的な種々の計測は行っていません。

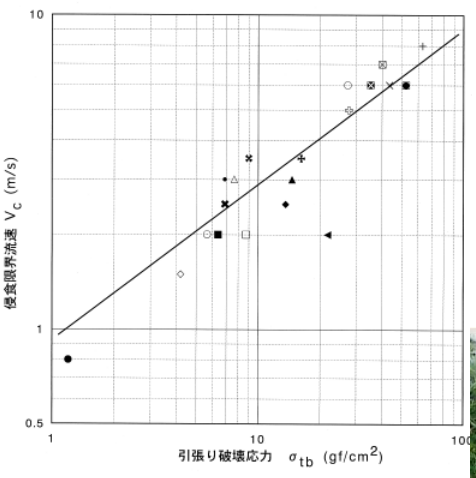
・当然、いろいろ疑問があって、それが土中への浸透にかかわるもの。

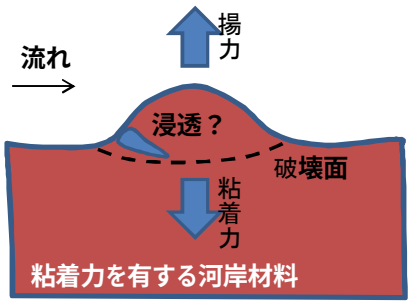
・例えば、凸部の流れを受ける上流面は水圧が上昇するので、これによって水流が土中に浸透するのではないか？すると不飽和な土では粘着力が変化して、それがきっかけとなって土塊が離脱する？さらには、水圧の高い浸透域がくさび状？？に土中に形成される（微細なヒビや砂層を挟んでいることも想定）ので、これも土塊の離脱に力を貸すのでは？ということを議論した。

・粘着性を有する土について、古くから研究されているが、一般的によく用いられる侵食限界流速・侵食速度の評価式はなし。まだ研究段階→そろそろ評価精度も実用上十分で、メカニズム面からも申し分のない式を設定したい、というのは河川工学の「願い」

．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

・さっぱりアイデアなし。少なくとも、河川工学の伝統的な解釈や掃流力のみでは、ここ 50 年ほどさしたる進展がないことは確か。





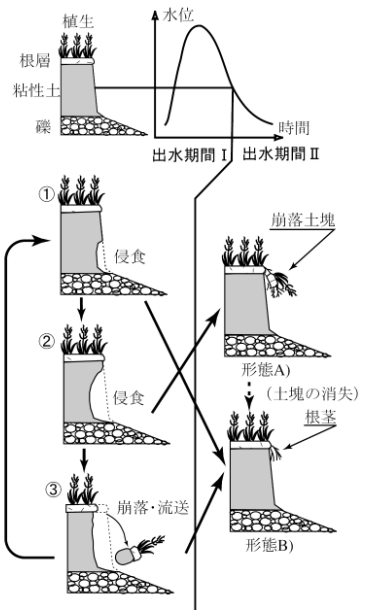


図-3.14　侵食限界流速と引張り破壊応力の関係（1gf/cm2 は 0.98×102Pa）

参考資料

No.	採取地	採取箇所・土質	土質分類	土粒子の密度	自然含水比	湿潤密度	乾燥密度	間隙比	試験後飽和度	飽和度	粒度構成 (%)					粒度	コンシステンシー特性	
		m		ρ_s(g/cm³)	ω_n (%)	ρ_t(g/cm³)	ρ_d(g/cm³)	e	S_{r2}	S_r (%)	礫	砂	砂以上	シルト	粘土	D_{60}	液性限界 w_L	塑性限界 w_p
1	人工盛土	関東ローム	(VH_2)	2.782	95.9	1.379	0.704	2.952	92.4	90.4	0.0	7.0	7.0	38.0	55.0	0.0066	137.2	71.3
2	人工盛土	江戸崎山砂	(SF)	2.682	24.0	1.804	1.455	0.844	88.9	76.3	0.0	51.0	51.0	32.0	17.0	0.1259	NP	NP
3	人工盛土	混合砂	(VH)	2.742	23.2	1.837	1.491	0.839		75.8	14.0	35.0	49.0	36.0	15.0	0.1122	50.6	32.7
4	堤体土	江戸川20km左岸堤防	(VH_1)	2.744	33.0	1.515	1.139	1.409		64.3	0.0	19.0	19.0	55.0	26.0	0.0282	42.9	30.2
5	自然土	利根川72.5km右岸	(SM)	2.710	16.9	1.651	1.412	0.919		49.8	0.0	59.0	59.0	30.0	11.0	0.1445	38.4	28.6
6	自然土	利根川87.5km左岸	(ML)	2.677	45.8	1.602	1.099	1.436		85.4	0.0	5.1	5.1	75.2	19.7	0.0290	47.4	35.0
7	自然土	利根川143.0km左岸	(OH)	2.610	76.4	1.327	0.752	2.470		80.7	0.0	14.1	14.1	60.0	25.9	0.0300	75.9	44.3
8	自然土	鬼怒川16.0km右岸 A	(C'H)	2.656	48.2	1.642	1.108	1.397	96.9	91.6	0.0	26.0	26.0	53.0	21.0	0.0417	63.5	36.4
9	自然土	鬼怒川16.0km右岸 B	(SF)	2.698	33.4	1.732	1.240	1.176	93.6	91.1	0.0	59.0	59.0	31.0	10.0	0.1259	NP	NP
10	自然土	鬼怒川16.0km左岸 C	(CH)	2.651	66.8	1.566	0.939	1.824	98.1	97.1	0.0	0.0	0.0	16.0	84.0	0.0015	101.0	38.3
11	自然土	鬼怒川27.25km右岸	(SM)	2.703	24.0	1.896	1.529	0.768		84.5	0.3	53.9	54.2	34.3	11.5	0.3000	36.7	28.1
12	自然土	小貝川6.0km左岸	(C'H)	2.640	65.1	1.381	0.836	2.156		79.7	0.0	32	32.0	37.0	31.0	0.0331	79.6	39.2
13	自然土	小貝川20.8km右岸	(C'H)	2.616	57.2	1.583	1.007	1.598		93.6	0.0	0.9	0.9	57.9	41.2	0.0090	69.5	36.7
14	自然土	小貝川22.1km右岸	(ML)	2.688	30.7	1.632	1.249	1.153		71.6	0.0	42.0	42.0	43.6	14.4	0.0800	36.6	24.9
15	自然土	小貝川34.2km右岸	(CH)	2.680	43.2	1.737	1.213	1.209		95.7	0.0	19.6	19.6	53.8	26.6	0.0250	52.2	27.7
16	自然土	小貝川41.0km左岸	(CL)	2.676	32.3	1.787	1.351	0.981		88.1	0.1	42.5	42.6	29.7	27.7	0.0810	41.1	24.7
17	自然土	小貝川48.3km左岸	(OH)	2.528	100.6	1.284	0.640	2.950		86.2	0.0	7.6	7.6	52.1	40.3	0.0090	114.2	53.6
18	自然土	小貝川49.4km右岸	(OH)	2.573	79.8	1.362	0.758	2.397		85.7	0.0	7.3	7.3	52.2	40.5	0.0120	99.8	50.4
19	自然土	小貝川56.3km左岸A	(SO)	2.586	42.3	1.445	1.015	1.547		70.7	7.0	45.1	52.1	30.3	17.6	0.1200	68.8	38.6
20	自然土	小貝川56.3km左岸B	(SM)	2.660	33.5	1.461	1.094	1.431		62.3	0.0	57.9	57.9	23.5	18.6	0.1500	52.9	36.0

人工盛土：実験場で盛土締固めを行い，採取した供試体

堤体土：堤防法面上から採取した供試体

自然土：高水敷など自然堆積土から採取した供試体

ここで，$I_p = W_L - W_P$，$I_C = \frac{W_L - w_n}{I_P}$　$I_L = \frac{w_n - W_P}{I_P}$，　$e = \frac{G_s\rho}{\rho_d} - 1$

$A = \frac{I_P}{\text{2m以下の粘土含有率}}$，$P_r = \frac{I_P}{W_P}$，$S_r = \frac{w_n}{\frac{\rho}{\rho_d} - \frac{1}{G_s}}$

写真-3.6　通水後の侵食面および離脱した土塊

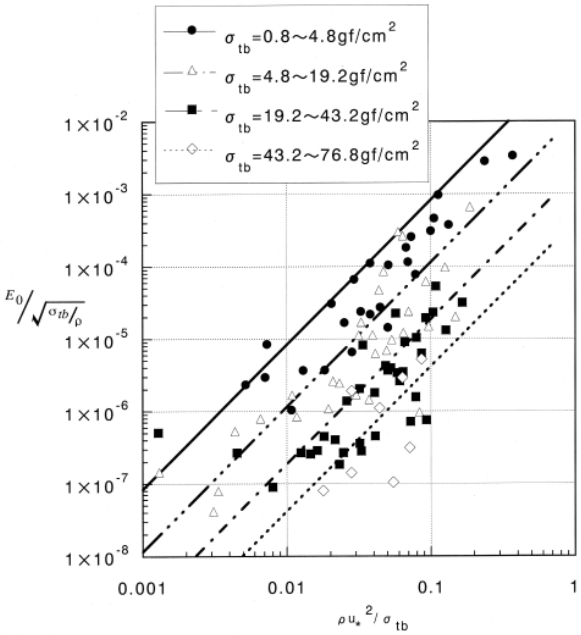
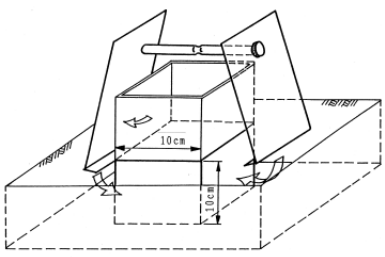


図-3.18　侵食速度 E_0 と摩擦速度 u_* の関係（1gf/cm²は 0.98×10²Pa）



供試体固定方法概念図

１．「実事例，実物大実験，模型実験」の名称

平成 24 年九州北部豪雨における矢部川の堤防決壊

２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

矢部川堤防調査委員会の報告書※によると、被災メカニズムは以下の通り。

●土質条件

決壊が生じた右岸 7.3k 付近の堤防は、昭和 25～28 年に築堤（引堤）された区間に位置し、堤体は粘性土で構成されていたと考えられる。基礎地盤には、基礎地盤の粘土質シルトと堤体の粘性土に挟まれ堤防を横断する形で、基礎地盤の上部に水が浸透しやすい 1m～1.5m の砂層（As 層）が局所的に存在し、この砂層は河岸から堤内地の途中まで連続して分布し、また高水敷の堤防側では表層の砂礫層と砂層（As 層）がつながっていたと考えられる。

●堤防決壊の経過

【フェーズ１】

・ 河川水位の上昇とともに、基礎地盤砂層の圧力が大きくなる。

【フェーズ２】

・ 基礎地盤砂層の圧力水頭（W）がのり尻部の上載荷重(被覆土層の重量：G)を上回り、盤ぶくれ及び漏水が生じる。

・ 漏水口より砂層の土粒子が噴出し、さらに連動して砂層の土粒子の細粒分が浸透流速により移動、噴出する。その結果Ａｓ層に空隙ができ、堤体の下への空隙・空洞化が進行する。

【フェーズ３】

・ 堤体下の空隙・空洞が大きくなり堤体を支持することができなくなり堤体が沈下・陥没する。（沈下・陥没の仕方としては、空隙・空洞の進行を考慮すると、裏のり、堤体中央へと徐々に進行する場合と、堤体が一気に沈下・陥没する場合とが想定される。）

【フェーズ４】

・ 堤体が沈下・陥没した結果、そこから河川水が集中して流れ出すとともに堤体を洗掘し決壊に至る。

【フェーズ５】

・ 決壊口からの河川水の流れ出しにより基礎地盤の砂層、及び堤体が洗掘されて、除々に決壊口が拡大していく（基礎地盤砂層が洗掘され、上部堤体が崩壊したことも想定される）。
また、地盤も洗掘され落堀が形成される。

・ 河川水位と氾濫域の水位差が小さくなった時、決壊口の拡大はほぼ終了する。

※ http://www.qsr.mlit.go.jp/chikugo/torikumi/01-plan_course/tyosa/index.html

３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

基礎地盤のパイピングによる堤防決壊危険箇所を推測するためには、基礎地盤の土質構成を詳細に把握する必要がある。矢部川の事例のように、河川側からの水が浸透しやすい透水層が堤防下の浅い箇所にパッチ状で分布しているような状況を把握するためには、相当密に土質調査を実施するしかないが、長大な区間の堤防で相当数の調査を行うことは非常に非効率で、コストの観点から現実的でない。

パイピング被害の危険度の高い箇所を優先的に調査するため、基礎地盤のパイピングが発生のしやすくなる要因の整理や、破堤に至る漏水と問題ない漏水の見分け方等に係る検討が望まれる。

１．「実事例，実物大実験，模型実験」の名称

刈谷田川，五十嵐川等越流破堤事例

２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

複合要因とされている事例もあるが，それぞれ越水により裏法面浸食等がおき，決壊に至ったと考えられている．

中には，越水に至るまでに浸透流等で変形がなかったのか等越水に至る過程が不明なケースもあり，越水から破堤に至った決定的要因は何だったのかは不明（越水しても破堤に至らないケースとの比較等はあまりされていない）．こうした過去の事例において，現在でも被災が予測できたのかは疑問．

３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

・溢れる場所の予測等越流のきっかけの予測

きっかけを外水位の上昇のみとすれば，植生の繁茂状況の変化を含め出水時の河道側の状況を取り入れるようなシステムをつくれば，どこで物理的に溢れるかの予測はある程度予測できるとは思う．しかし，堤防の変形や縦断方向の不均一性など詳細な情報を取り入れるのは難しいため，正確に破堤箇所を予測するのは困難と思われる．特に出水時の堤防変形が原因で溢れている場合は，予測困難である．

また，越水による破堤が起こる可能性が高いのは，情報がたくさんある大河川より中小河川の方である．そのため，こうした中小河川の堤防管理の在り方も課題の一つに思う．

・破堤現象の予測

これまでの研究により，越流破堤現象の定性的予測は，ある程度数値解析等で可能とされている．ただし，堤防の形状，粒度，被覆条件によって時間変化が多少異なってくるため，各地点での詳細予測という面では厳密な解析は難しい．しかし，逆に詳細な検討はそれほど生かされる場がなく，現時点では，氾濫流量に関わるような“現象を大きく変えるポイント”の把握程度の，定性的な予測で十分な面もあると考える．（詳細が分かったところで管理にどう生かされるのか？）

※上記課題と少しはずれますが，合同 WG について少し 個人的な意見を書かせていただきます．

堤防を対象とする研究に対しては，大きく，計画内の水位までをいかに守るかという堤防管理に関わる視点と破堤現象から氾濫予測を含め被災をどう軽減するかという視点があるかと思います．また，その中で定量的に詳細に研究・把握すべきものと定量的に研究してもそれほど意味をなさず定性的に知ることからでも十分意味があるものがあるように思います．WG へは途中参加のためすでに議論があり，的が外れているかもしれませんが，こうした視点も取り入れ，堤防研究の全体枠組みとともに地盤工学と水工学とが連携して取り組むべきことを再度整理（確認？）してもらえることを期待します．

特に，堤防管理に関する研究は，最終的には安全度に結び付ける必要があり，どこまで分かればどう安全度に生きるのかを考え，全体的に発展するように，全体のバランスをみて遅れている研究分野，足りない研究分野を推進すべきようにも思っています．

以上，合同 WG の趣旨を履き違えた意見となっているかもしれません．その場合は，ご容赦ください．

１．堤防表層地盤における浸透特性値の原位置計測

２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

①透水異方性・不均質性：Local scale / Field scale での評価

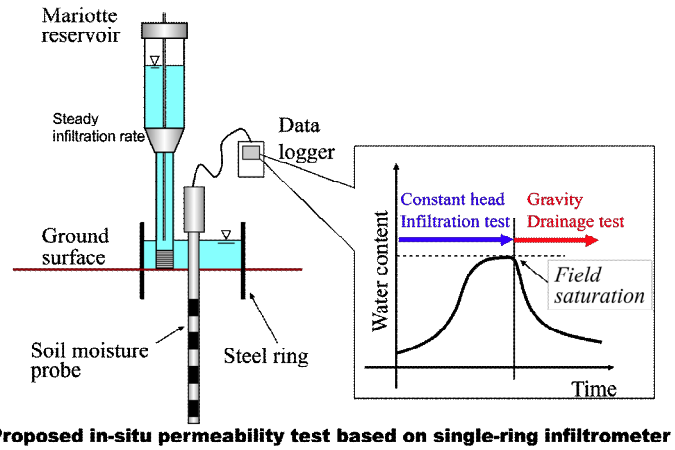
②初期条件（非定常試験）と境界条件（定常試験）の計測：原位置試験／室内試験（基準化）

③不飽和浸透特性値の非線形性：パラメータの感度解析と計測（算定）精度の評価

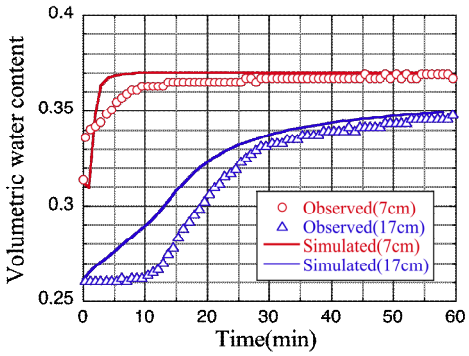
３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

①挿入型土中水分量計を併用した原位置定水位透水試験（Local scale）

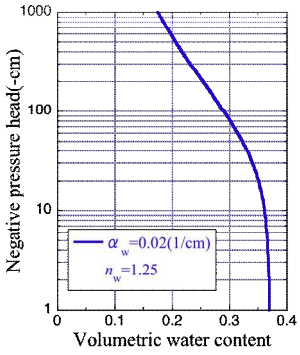
現場飽和透水係数・現場飽和体積含水率の算定と不飽和浸透特性値の推定



Proposed in-situ permeability test based on single-ring infiltrometer



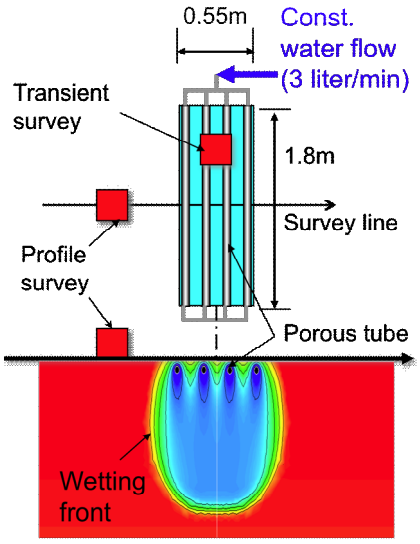
原位置透水試験時の土中水分量計測



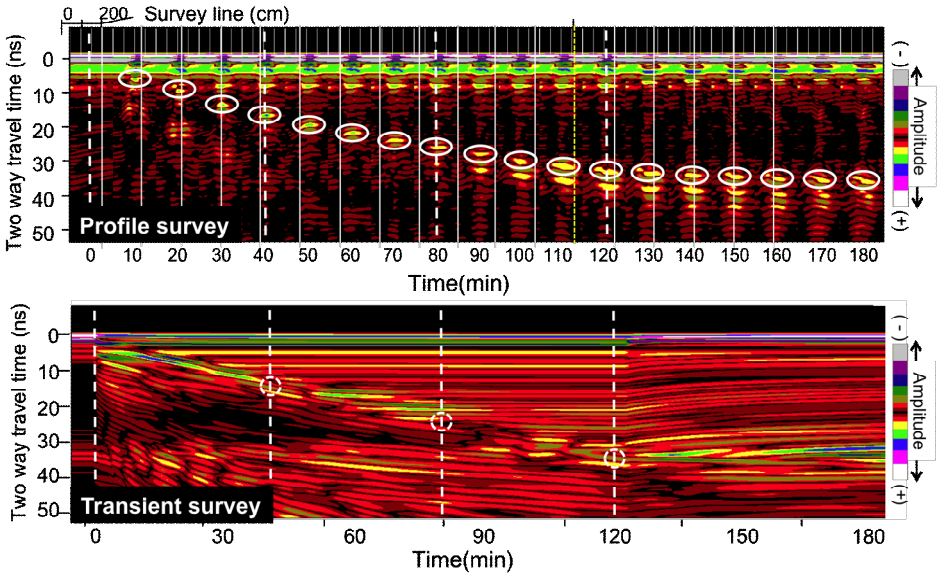
水分特性曲線の推定例

②物理探査技術（地中レーダなど）を援用した非破壊試験（Field scale）

地盤の誘電率分布の定量的把握　→　浸透挙動（浸潤前線位置）のトレース



Proposed in-situ infiltration test by using surface ground-penetrating radar



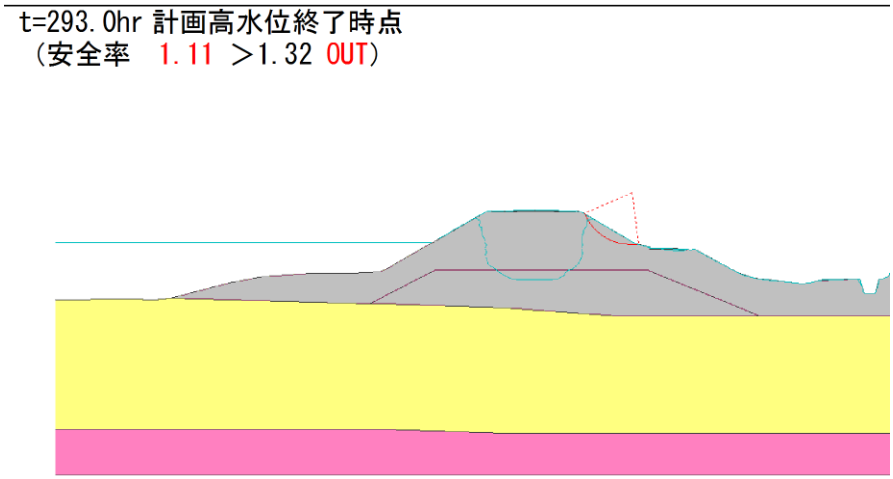
地中レーダによる浸潤前線位置のトレース事例（定流量浸潤120分）

１．「実事例，実物大実験，模型実験」の名称

浸透に対する安全性照査方法：降雨のみによる浸透破壊現象について（本当に危険なのか？）

２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

河川堤防の浸透破壊に対して「河川堤防の構造検討の手引き」等に準拠した照査方法では，モデル化した堤防に外力条件として河川水位および降雨を与えて浸透流解析を行い，得られた湿潤面を用いて安定計算（円弧すべり計算）を行うものとなっており，国管理河川では（ほぼ同一の方法で）全区間の照査が完了している．ここで，洪水もしくは洪水＋降雨で安全性ＮＧとなっている箇所は堤防強化の必要性について説明が出来るが，下図のように降雨浸透のみで堤体のり面付近の飽和域が拡大し，照査ＮＧとなっている事例も多く，これらの箇所の堤防強化の必要性については少し違和感を持っている．（因みに下図の例は，洪水なしで降雨浸透のみでもＮＧとなる）



３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

現在の照査方法では，上記のような結果についてもＮＧと判定し，堤防強化対策を実施するものとなっている（実際，このような事例に対して各地で堤防強化の詳細設計が進められている）．しかし，浸透破壊の進行性という観点で考えると，たとえ裏のりが降雨ですべり破壊をしても，それ以後に破壊が進行して破堤に至る可能性は低いと思われる．

また，外力の設定についても，洪水位は計画高水波形を重ね合わせて，その河川特有の外力（河川水位）波形を与えているが，降雨は計画降雨相当量を一律に与えることになっており，降雨波形に対する河川ごとの特徴はない．

これより，降雨のみＮＧ箇所と，洪水でＮＧ箇所を堤防強化の優先度に対して同列に扱うべきか，また降雨波形等に河川特有の条件を考える必要はないか等の課題があると考えている．

１．「実事例，実物大実験，模型実験」の名称

浸透に対する安全性照査：破壊の進行性を考慮した上で現状の照査基準の妥当性について

２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

堤防の浸透に対する安全性照査では，すべり破壊および浸透破壊（パイピング破壊，基礎地盤の盤ぶくれ）に対して照査基準を満足するかを確認するものである．すべり破壊および浸透破壊については，それらの現象が「発生するか」について照査するものであるが，その破壊が進行して破堤に至るかという点での整理はされていない．これについて，以下のようなことを検討する段階にあるのではと考えている．

・堤内側で生じる盤ぶくれ（パイピング）現象は，本当に破堤につながるのか．
・すべり破壊，パイピング破壊の進行性という視点での評価は必要ないか．
・計画断面に余裕のある断面でのすべり破壊ＮＧ結果をどうするか．
・多少損傷しても，洪水を乗り切ればよいという考え方は導入できないか．

表 4.2.1　浸透に対する安全性の照査基準[1)]

項　目	部 位	照　査　基　準
すべり破壊（浸潤破壊）に対する安全性	裏のり	$F_s \geqq 1.2 \times \alpha_1 \times \alpha_2$ F_s；すべり破壊に対する安全率 α_1；築堤履歴の複雑さに対する割増係数 築堤履歴が複雑な場合 $\alpha_1=1.2$ 築堤履歴が単純な場合 $\alpha_1=1.1$ 新設堤防の場合 $\alpha_1=1.0$ α_2；基礎地盤の複雑さに対する割増係数 被災履歴あるいは要注意地形がある場合 $\alpha_2=1.1$ 被災履歴あるいは要注意地形がない場合 $\alpha_2=1.0$
	表のり	$F_s \geqq 1.0$ F_s；すべり破壊に対する安全率
パイピング破壊（浸透破壊）に対する安全性	被覆土なし	$i<0.5$ i；裏のり尻近傍の基礎地盤の局所動水勾配の最大値
	被覆土あり	$G/W>1.0$ G；被覆土層の重量 W；被覆土層基底面に作用する揚圧力

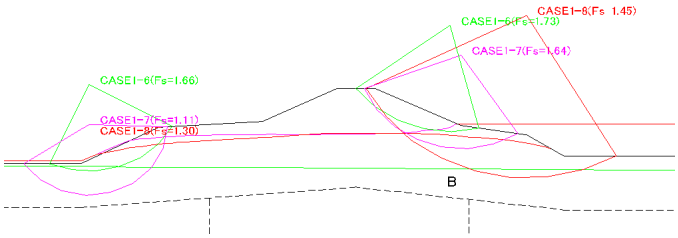


図　断面余裕がある箇所で裏のりすべりＮＧとした例

３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

これまでに安全性照査でＮＧであった箇所について，今後，堤防強化（対策工設置）を実施するにあたり，例えば以下のようなことを考慮すべきでないかと考える．

・破壊の進行性を考慮した照査方法，基準の導入．

・耐震と同様に，破壊しないレベル（Ｌ１），破壊するが機能は確保されるレベル（Ｌ２）という考え方を導入して，地区別・優先度別に対策レベルを変えるという考え方はできないか．

１．「実事例，実物大実験，模型実験」の名称

模型実験：堤体の表層締固めが堤体内浸透特性に与える影響

２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

堤体高１mの小型模型堤防で浸透実験を行い，再現計算を行ったところ，堤体表層付近の透水性を極端に小さくする必要があった．実験に用いた土は，実際に現場で用いている堤防強化用混合改良土である．この結果については，堤体表層の施工（締固め）が影響していると考えられる．また，解析結果から推定された透水異方性については，層状に作成した堤体の作成方法が影響していると考えられる．

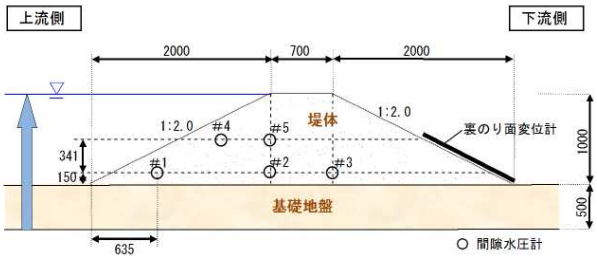
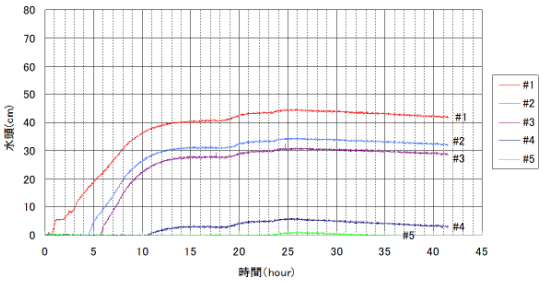
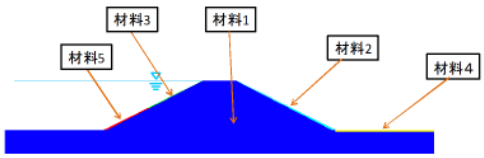


図１　小型堤防模型





材料	水平透水係数	鉛直透水係数
材料 1	8.79×10^{-5}m/s	6.79×10^{-6}m/s
材料 2	4.79×10^{-5}m/s	4.79×10^{-6}m/s
材料 3	3.79×10^{-7}m/s	3.79×10^{-7}m/s
材料 4	4.79×10^{-6}m/s	4.79×10^{-6}m/s

※與田，岡ほか；小型堤防による堤体内浸透特性の実験的研究，第 45 回地盤工学研究発表会より

３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

上記実験結果から明らかとなった問題点は，実堤防において，堤防天端やのり面の表層の締固め状況や，築堤時の施工方法が，堤体内浸透特性に与える影響は小さくないと思われることである．しかし，浸透評価を行うために実施する一般的な土質調査方法は，堤防天端・表のり面・裏のり面の 3 箇所において，堤体材料の室内土質試験および基礎地盤の現場透水試験を実施するものであり，実験で課題となった表層の締固め状況や堤体材料の透水異方性を把握することはできない．すなわち，現在の土質調査方法では，洪水時の堤体内浸透状況を正確に評価できていない可能性がある．（ただし，上記の実験・解析結果は，今回使用した実験土に対してである．その他の土質材料では異なる評価となるかもしれない）

これに対しては，堤体内の浸透特性を把握するための模型実験（小型で良い？）を，さまざまな条件下で実施して，これを正確に解析で再現できる技術と，必要な調査項目を把握し，現地での調査に反映することが必要であると思われる．

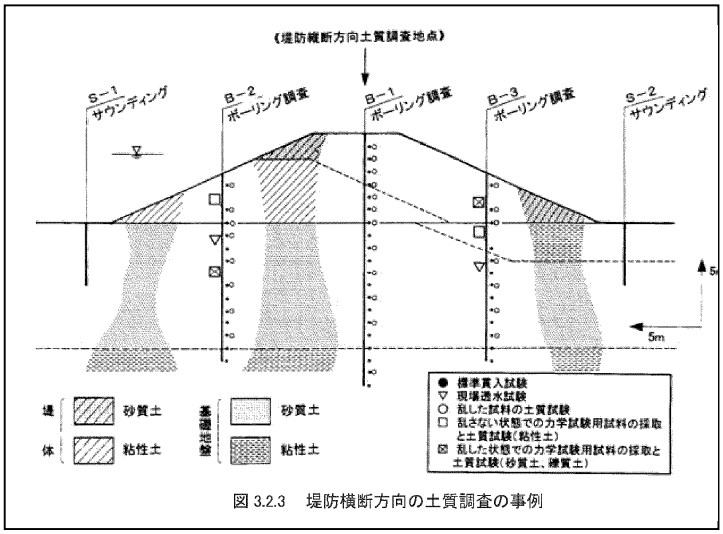


図 3.2.3　堤防横断方向の土質調査の事例

１．「実事例，実物大実験，模型実験」の名称

実事例：土堤防の陥没

昨年の７月豪雨で，九州地方のある河川において堤防被害が発生した。その他にも土堤防にて陥没が生じており，その事例を以下に示す。

【事例 1】

出水後に，幅 4m×長さ 5m×深さ 1m 程度の陥没が発見された。陥没箇所側面がほぼ垂直なこと，表面に植生が付いた土砂があること等から，当初は被災はすべり破壊ではなく『陥没』と推定された。

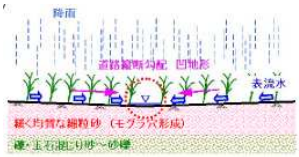
【事例 2】

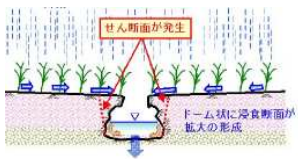
出水後に，幅 4m×長さ 12m×深さ 1m の陥没が発生した。なお，被災箇所近くには取水施設（井戸）があることから，比較的透水性の良い地盤が存在することが推定された。

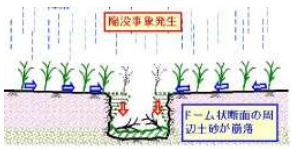
２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

事例 1 については，天端道路の排水が適切でないこと，その他の陥没も含めてのり肩から陥没を受けていること，ガリ侵食箇所も多数認められること等から，表流水による侵食破壊による被災と推察した。

これを検証するため，天端道路を詳細にレベル測量（1m～5m ピッチ）し，路面の不陸と被災箇所を整理した。その結果，路面が凹地形になっている箇所に，被災箇所が存在する箇所が多いことがわかった。したがって，被災メカニズムは以下の通り推察した。なお，モグラ穴は地表面から深度 0.5m までしか分布していないことから，直接的な陥没原因ではないものの，侵食を助長する一因になっていると推察され，侵食された土砂は堤脚水路から流出したものと推察した。







事例 2 については，ボーリング調査によって堤体直下に玉石層が確認されたこと，レーダ探査により所々で空洞や緩みと思われる反射面が認められたこと等から，堤体の緩い土砂が深部に移動し，空洞が発生したものと推察した。また，陥没箇所横には堤脚水路があったが，枯葉や土砂によって閉塞されており，周辺の表流水がこの陥没箇所に集中的に流下していた。

以上から，降雨の際には表流水が集中して浸透していたこと，7 月豪雨では地下水位が上昇し一気に低下したことにより，堤体土が下方に移動し空洞が拡大したものと推察された。

この事象を検証するため，陥没箇所の掘削を行った。この結果，レーダ探査で反応があった深度付近には右写真のような玉石間の空洞が所々で発見された。ただし，下方に移動した土砂の行き先は不明である。

３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

陥没が発生する箇所はいくつかの共通する特徴があるものと想定されるため，その特徴を整理し，点検箇所を絞り込んだり，対策することによって，効率的な堤防の保守・点検が可能となるのではないか？

陥没が発生しやすい条件として，

1)降雨時に集水しやすい地形や堤防の形状箇所

2)透水性がよい土質で構成され，地下水位が急激に変化するような堤防では，細粒分が流出しやすい。

１．「実事例，実物大実験，模型実験」の名称

中小河川のカミソリ堤

２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

1) 事例写真：カミソリ堤、天井川、川幅一定、流路は直線的。
2) 「浸透に対する安全性の照査」では NG　→　対策工はドレーン。実際には、浸透対策よりも河積の確保が課題。
3) 被災履歴は、昭和 20 年代まで遡る（近年の被災はない）。河積の確保が課題と言いながら、越水被害もしばらく発生していない。伏流水が多く、上手く水が抜けているのかもしれない。
4) 中小河川の場合、洪水継続時間が短いので、一見脆弱に見える堤防断面でも被災に至らない。浸透破壊を考えるとき、洪水継続時間、降雨継続時間といった時間的要素の影響は大きいはず。
5) 浸透流計算の基本条件として、計画高水位継続時間や降雨量（降雨強度×降雨継続時間）が設定されるが、これ自体が安全性を判断する指標にはなり得ない（当然と言えば当然）。
6) 「浸透破壊」と理解される被害は、漏水（パイピング）、内部侵食、表層すべり等が複合して発生すると考えている。
7) 漏水（パイピング）だけなら、破壊には至らない（かもしれない）。破壊に至るには、水ミチが拡大する「きっかけ」が必要。
8) その「きっかけ」が、長時間に渡る浸潤（強度低下）に起因する表層すべりや内部侵食ではないか。

３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

１．「実事例，実物大実験，模型実験」の名称

浸透破壊：例えば矢部川，実物大実験

２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

着目している現象のスケール（フォーカススケール）と現象を考えているスケール（現象把握スケール）とは一致しているのか．

土粒子レベル，土塊レベル，構造体（堤体レベル）

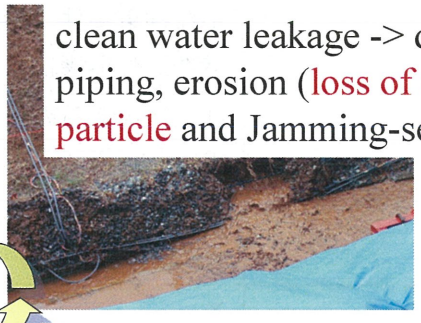
- パイピング先端の掃流力，透水力，内部浸食　→　土塊内の塑性変形・破壊
- 掃流力と透水力の連鎖
- 現象の階層化（マルチスケールでの相互作用）は，微視化や粗視化で解決するか．
- ・作用力と作用時間
- ・作用の速度と透水係数（透気係数）　　$\sigma = E\varepsilon$，　$\sigma = \rho cv$

３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

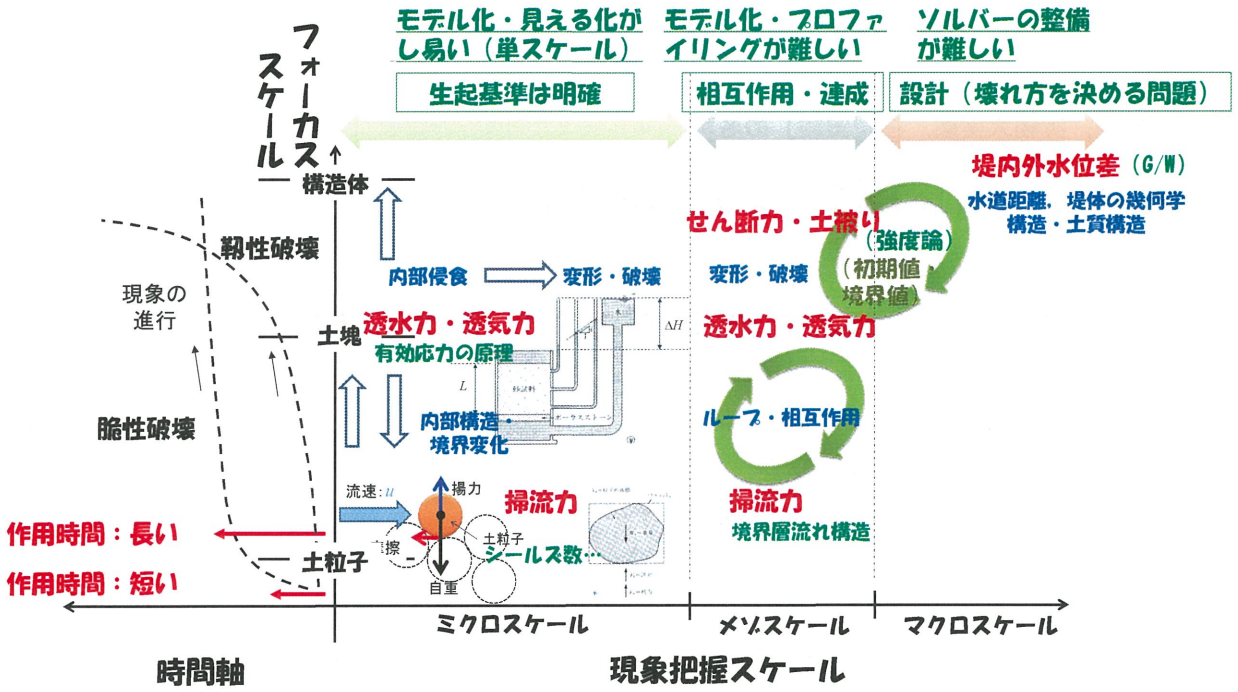
Heavy rain 130-150 mm/*h*

Surface flow -> seepage into slope , small piping

Sliding and cracking



clean water leakage -> dark : piping, erosion (loss of fine particle and Jamming-sealing



予測・評価：　　把握が可能か，そのためには何が必要か．

		着目する現象のスケール		
		土粒子レベル	土塊	構造体
現象把握レベル	ミクロスケール	◎生起基準のみ	HPC なら◎（プロファイル（内部構造・境界）の変化を伴う場合でも OK） 適当な粗視化＋（数値）実験式で○	×HPC???
	メゾスケール	？土粒子レベルにどんな拘束条件（間隙構造，骨格構造の統計量）があるのかを明らかにする必要あり．	○生起基準のみ △プロファイルの変化を伴う場合→ミクロスケールでの数値実験結果を利用した相互作用モデルの開発が必要	○（生起基準のみ） △プロファイルの変化を伴う場合は新しいソルバーが必要（ポスト破壊の議論が可能なソルバー）
	マクロスケール	×	×	実物大実験，遠心力模型実験（データのアーカイブが必要） ○適切な強度論が必要 ×プロファイルの変化を伴う場合

１．「実事例，実物大実験，模型実験」の名称

弱部を探す間隙水，間隙空気：

東海豪雨，台風 15 号，福島・新潟豪雨（2011），模型実験

２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

弱部とは，潜在的なものか？　誘導発展するものか？
間隙空気による構造物としての堤体の劣化
・亀裂が発展する前の間隙空気の噴出
・豪雨および急速な浸潤または水位低下に伴う間隙空気の噴出

３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

予測・評価（１）：　弱面の定義とは？
　現状：　弱部　＝　土質と層の境界　？（←物理探査）
　課題：　構造設計では，弱部は，外力（波形を含む）と部材と部材配置で決まる．
　　では，堤防は？

予測・評価（２）：　潜在か？　誘導発展か？
　課題１：　潜在的な弱部　（水道・クラック）の把握ができるのか？
　課題２：　外力と外力履歴による発展を追える計算技術はあるのか．
　　長期モニタリング，データベース蓄積は必然か．

１．新潟・福島豪雨　信濃川左岸エアブロー事例

豪雨時期；2011 年 7／26～7／30

場所；JR 弥彦線　右岸上流約 200m 付近

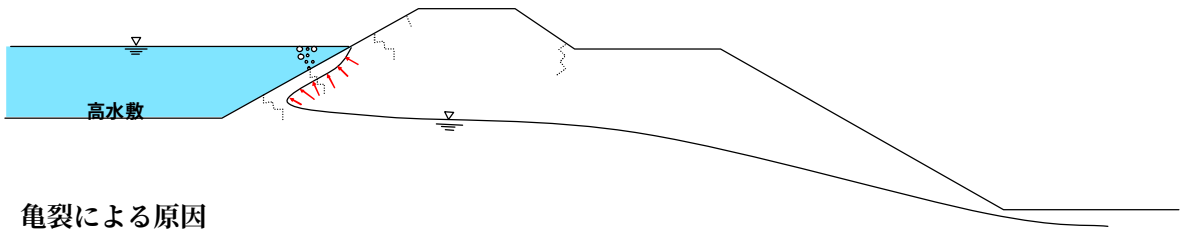
2011.7.30 撮影

2011.8.20 撮影（噴気孔？）

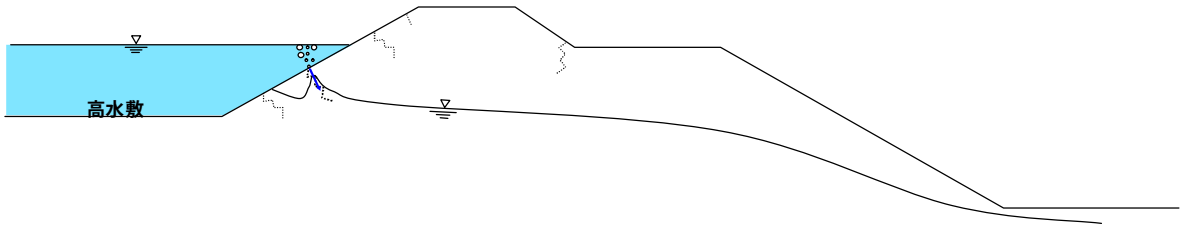
2011.7.30 撮影（エアブロー）

２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

2.1　エア圧による原因



2.2　亀裂による原因



※エアブローによる堤防の安全性への影響はあるのか？エアの通り道による弱線の形成、結果的に堤内地の法尻までの浸潤距離の短縮？

３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

透気係数、透水係数、層構成、断面による解析。課題としてはこれらの不均一性。

１．台風 15 号豪雨　越流堰ライニング破損

豪雨時期；2011 年 9／20～21　場所；庄内川右岸　新川洗堰

2011.9.30 撮影

2011.9.30 撮影

2011.9.30 撮影

2011.9.30 撮影

2011.9.20 当日撮影

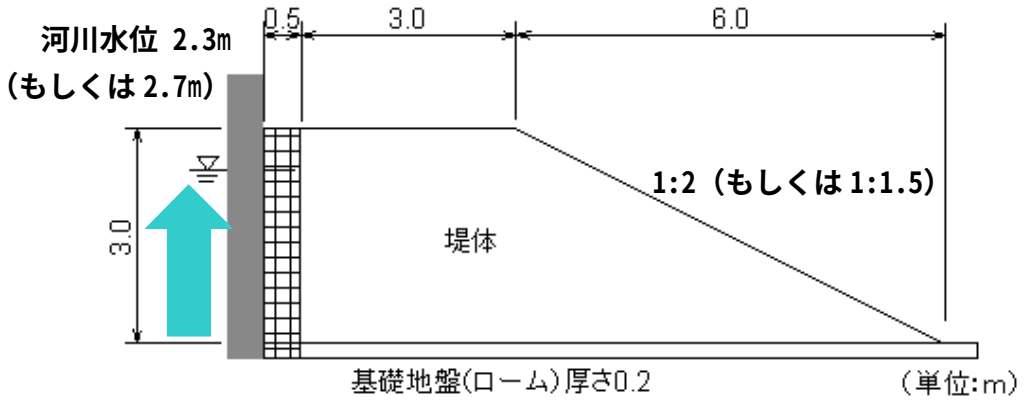
- 洗堰新川側のコンクリートライニング（厚さ約 50cm）の浮き上がり（痕跡より洪水時水位付近か？）
- 同、法尻布団かごの破損
- 庄内川側道路端部からのエアブロー

２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．

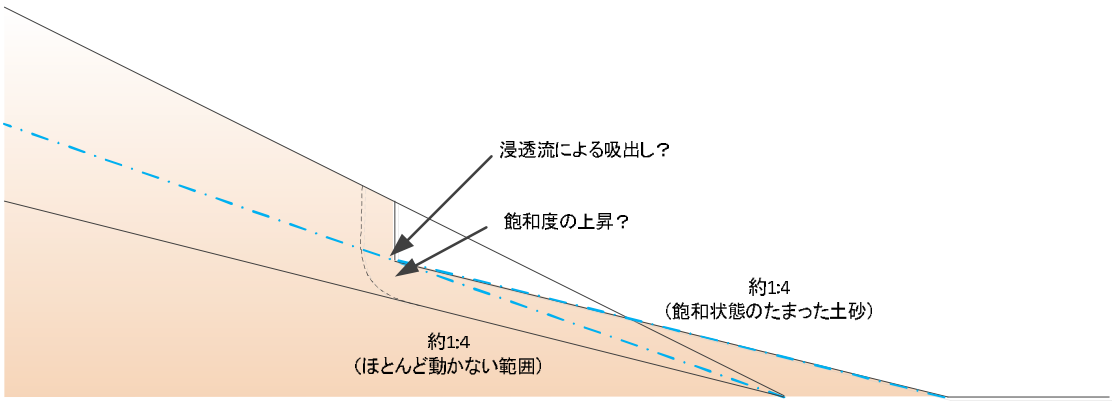
越流水によるアップリフトおよび、エア抜き管が機能せずライニングがキャッピング効果を果たした？ライニング下には遮水シートを確認

３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．

堤体の浸透破壊に関する大型模型実験（堤高 3m）



Dc	10%(1:2,2.3m)	30%(1:1.5,2.7m)	50%(1:1.5,2.7m)
85%	k_s=2.3E-3，48h	k_s=3.3E-3，30h	-
90%	k_s=1.4E-3，72h	k_s=3.9E-4，144h	k_s=2.3E-5，1004h



1

堤内基盤排水工法に関する遠心模型実験（堤高 10m）

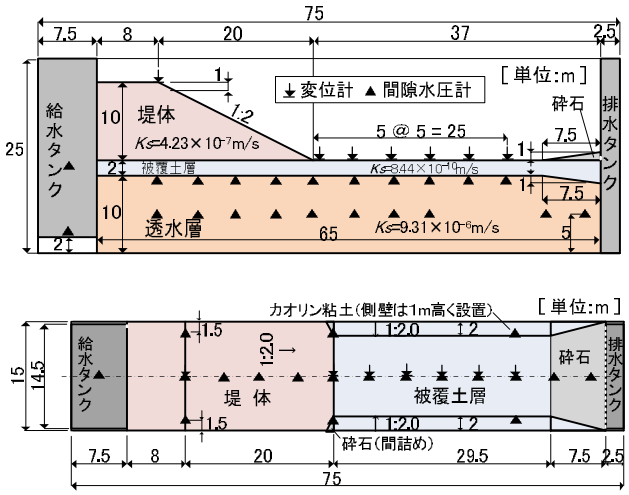


図-1．ケース１（無対策）の形状

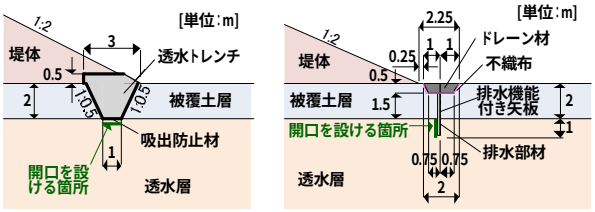


図-2.透水トレンチ,排水機能付き矢板の横断形状

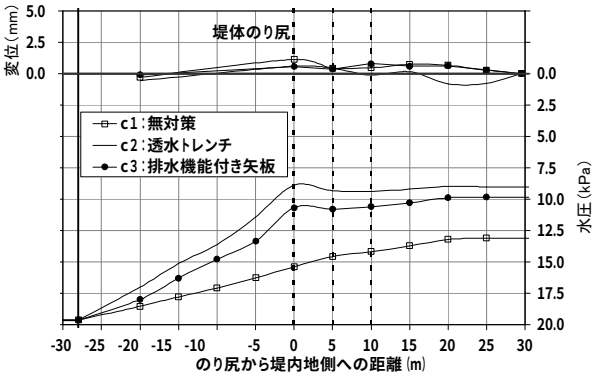


図-3.外水位 2m 時点の水圧・変位の関係

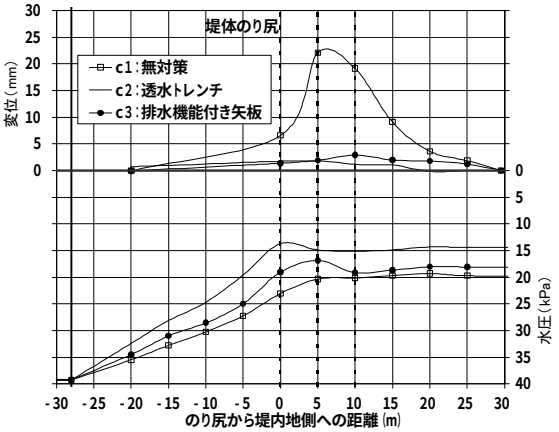


図-4.外水位 4m 時点の水圧・変位の関係

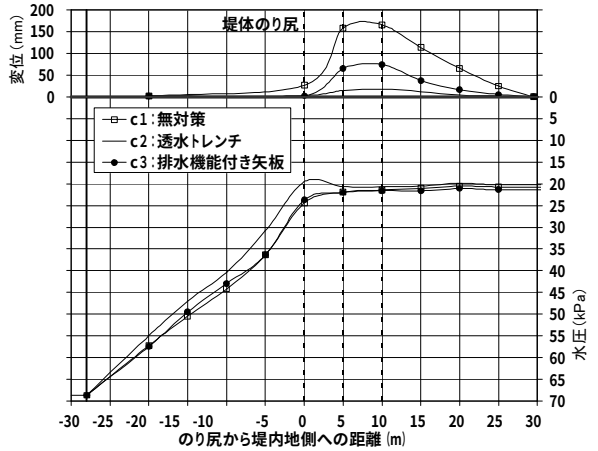


図-5.外水位 7m 時点の水圧・変位の関係

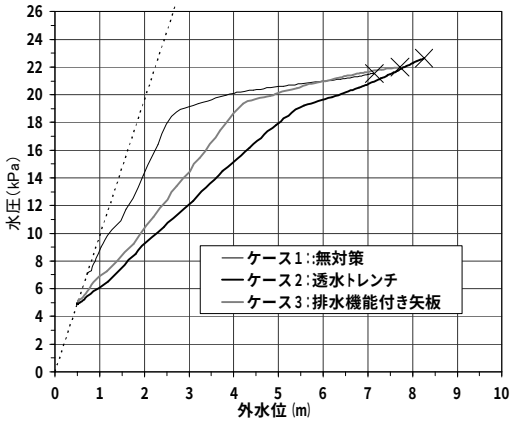
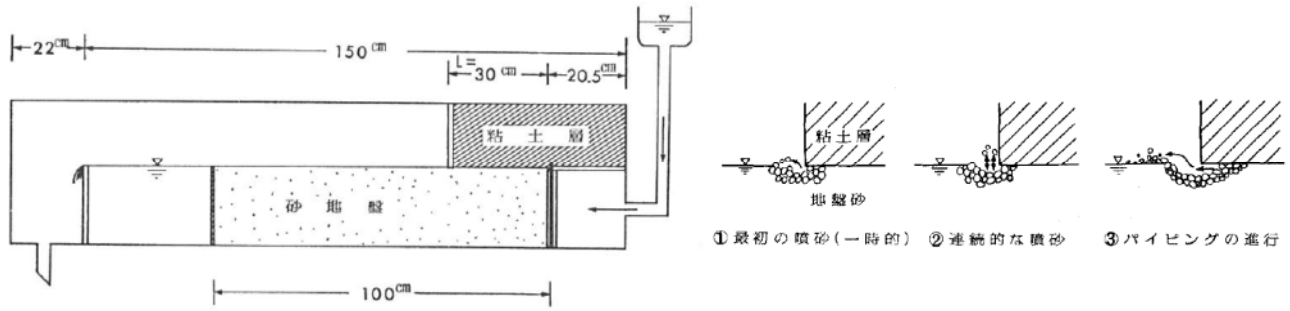


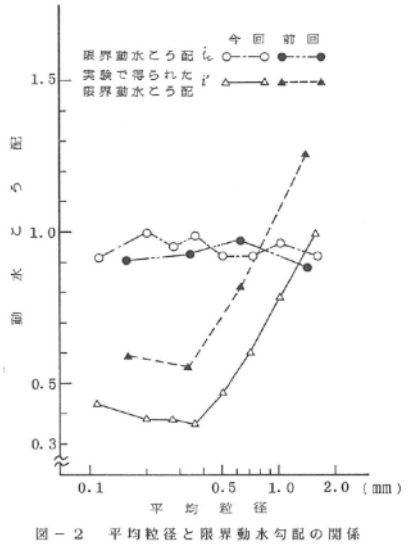
図-6．外水位と水圧の関係

１．水平流れが卓越する場合の限界動水勾配、限界流速？

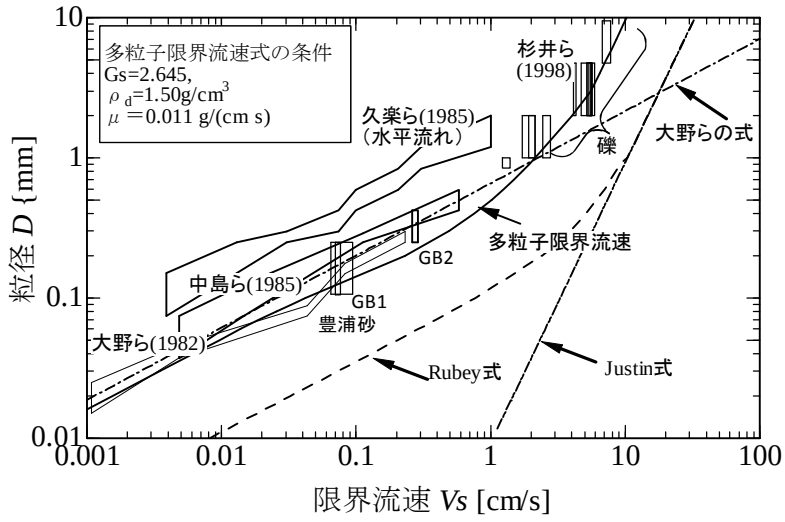


図－１　実験装置および実験模型

1)久楽勝行・吉岡淳・佐藤正博：水平方向浸透流下における砂地盤のﾊﾟｲﾋﾟﾝｸﾞについて，第 20 回土質工学研究発表会，pp.1483～1484, 1985.



図－２　平均粒径と限界動水勾配の関係



２．どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか.

現在、局所動水勾配の考え方はのり尻部の鉛直・水平ともに i_v,,i_h<0.5 であるが、適切であるか。

力のつり合いは流向によって異なるが、明らかにされていない。その現象が進行して破壊に進行するのか、局所的なものに終わるのかも明らかでない。しかし、水平流れが卓越する場での実験の実施が必要であるが、境界条件などの設定や破壊時の判断が難しく、進んでいなかった現状にある。

３．それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は.

内部浸食現象は土粒子、間隙レベルで評価することで可能と考える。間隙径と限界流速に達する粒度分布の関係を使う。破壊の判断は、間隙率の変化（誘電率式土壌水分計の利用）によって判断できるようになるが（杉井ら（2009））、水平流れについてのつり合いについては、上載荷重の影響を含めた模型実験の実施が必要である。

2)杉井・山田・名倉：限界流速からみた浸透破壊の発生と進行，地盤工学会誌，Vol.57，No.9，pp.26-29,2009.

地盤工学委員会堤防小委員会「浸食・浸透破壊・洗掘 WG」＋水工学委員会河川部会「堤防 WG」

第 3 回合同会議　議事録（案）

日　時　：　2013 年 7 月 30 日（木）15:00～17:00
場　所　：　（社）土木学会Ｅ会議室
出席者　：　[浸食・浸透破壊・洗掘 WG]
前田，佐々木，坂本，小高，高橋，杉井，石田，仙頭，竹下，藤本，與田，李
[堤防 WG]
服部，松本，溝口，三戸，三輪，阿部
［オブザーバー］
泉，松田，森　（敬称略）

■議題

１．前回議事録確認
２．6/6 開催 河川シンポジウム連携 WG 主催セッションの報告
３．第 2 回の発表資料にもとづく課題整理
４．今後の連携会議の進め方について
５．次回の合同会議について（議題と開催日時）

■配布資料

・前回議事録
・第 3 回合同会議議事と依頼事項
・第 2 回意見集約
・WG 連携活動案
・2013 河川シンポ：OPS1 報告書（案）
・OPS1 話題提供発表資料

■議事内容

１．6/6 開催　河川シンポジウム連携 WG 主催セッションの報告

・服部リーダーより、河川シンポジウムにおいて開催したオーガナイズドポスターセッション（OPS1）の概要について報告があった。
・主に、各種の実験において、粒度分布により土粒子の移動形態が異なることが確認されている点について、意見交換が行われた。

２．第２回の発表資料にもとづく課題整理

・服部リーダーより、第 2 回の合同会議で各メンバーから発表された資料にもとづいて、課題を整理した結果について説明があった。
・課題は以下の４つに分類される。
①降雨・河川水の堤体・基盤への浸透
原位置試験や室内試験により浸透現象のより深い理解が必要。土中の空気の挙動に対する考慮も必要。

②変状の形態

泥濘化や流動、噴砂後の空洞形成、モグラ穴のような空洞の形成、玉石層への細粒分の吸出しによる陥没といった様々な変状形態が例示されているが、これらの現象について理解が必要。

③変状の発達

脆性・延性、進行性破壊といった現象に対する理解と、それらが破堤に至るかどうかの評価方法についての検討が必要。

④現象解明・危険の事前察知

現場での観測にもとづき既往出水による「症歴」の分析が必要。また、事前に危険を察知するための技術に対する取り組みが必要。

・破壊には、浸透による破壊とせん断による破壊があると思われるが、これらの連動性についてはわからない点が多い。
・破壊の多くは浸透破壊がきっかけに起こる場合が多い。
・浸透破壊とは、溶けるような破壊（泥濘化）を指す。
・粒子間に拘束圧が加わると移動しにくくなることが経験的に確認されている。
・浸透破壊は有効応力がゼロになった状態で生じているのではないか。
・浸透破壊も一種のせん断破壊と考えられるのではないか。
・静水圧と浸透流という外力の違いで分類する考え方もある。
・拘束圧、動水勾配、流速、粒度分布から浸透破壊に対する安全性が評価できるとよい。
・評価にはＤｗ（調和平均径，粒子表面積との相関がよい）を用いるのがよいのではないか。
・粒子が動き出すときの条件と併せて、その後に粒子移動が進行する条件について考える必要がある（時間の概念が必要)。
・目詰まりと移動を繰り返しながら粒子の移動が進行するという現象も確認されており、進行性の現象についての理解が必要である。
・粒子が抜けた後の空洞部分については、周辺の土がもつアーチ効果も考慮する必要がある。
・水圧の大きさによっても粒子の動き方が異なる。
・堤内地に被覆層がある場合は、高水時に作用する水圧によって、透水層内では有効応力が大きく減少（液状化と同様にそれによって粒子間の拘束圧が減少）するため、局所的な噴出があると粒子が移動しやすい条件になっている可能性がある。
・G/W のみの議論にとどまらず、噴出後の粒子の動きについても議論が必要である。

３．今後の連携会議の進め方について

・今後は上記の②と③を中心に議論を進める。
・様々な現象を整理するために、まずは前田先生を中心に破壊のプロセスがわかる紙芝居を作っていただく。次回は、それをもとに議論を行う。

４．次回の合同会議について

・資料作成の進捗状況を踏まえて後日日程調整する。

以上

第 2 回会議の意見集約 by 服部

【】書きの番号は第 2 回討議資料の左上□囲み番号に対応

① 降雨・河川水の堤体・基盤への浸透：現象を変えうる種々の要因とその再現に向けて

- 不飽和の透水特性値、透水の異方性・不均質性の現地計測・室内実験によるより深い理解（締め固めの表面と内部、植生の有無による透水性への影響）【８】【１１】
- その把握のための試験方法の標準化【８】【１１】
- 浸透現象の予測には、場合によっては水のみでなく空気の流れ（排気）も考慮すべき。さらに排気（エアブロー）で堤体表部が損壊することもあり得るのでは【１６】【１７】

② 変状の形態：浸透破壊の多様な発生形態・プロセス、および円弧すべりに代表されるのり面崩壊現象との区分・共存

- 土質、水位等を系統的に変えた大規模実験：泥濘化・流動と見られる法尻からののり面欠損と、破壊面を伴う土塊の変位と見られるのり面崩壊のどちらが発生するか？狙って再現できない。条件が明確できていない【１】【１８】
- 盤ふくれ（粘性土の被覆土層を突き破っての噴砂）事例：粘性土を主体とした被覆土層であっても、砂質土の不規則な混入や人為攪乱があると、被覆土層の重量を土層下面に作用する水圧が上回るという従来の評価より、低い水圧で噴砂に至った。被覆土層の不均質性を考慮することの重要性、さらに一度噴砂が生じた箇所を盛土して抑える（拡築など）場合の留意点として【２】
- パイピングと見なせる 2 つの現象：伝統的？にはモグラ孔のような空洞の形成・延伸、最近の研究では、砂質土から細粒分が抜け落ちて強度を失う地盤構造の「骨粗しょう症」とでもいうべき現象も考えられている。両者とも現場でも生じているのか？現象のとらえ方が変わると対策・点検ではなにを考えるべきか？【４】
- 玉石層を基盤表層にもつ堤防の陥没事例：玉石層から細粒分が抜け落ちて玉石間に間隙が形成、ここを抜け穴として堤体土が流失することで堤体が陥没した事例。砂層の「骨粗鬆症」とは違い、礫層が強度を失い崩壊することはないが、違った形態で堤体の崩壊に至る可能性を示唆【１２】
- すべり破壊と浸透破壊の共存・相互作用現象が見られた大型実験：のり尻での浸透破壊が進行するなかで一時的に空洞内に土砂が詰まったらしく湧水量が激減、その直後にのり面のすべり崩壊発生、のり尻から再度噴砂とともに水が出るとすべりの

進行が停止。破壊の進行過程では複合的な現象も生じうることを強く示唆【１４】

・ 浸透破壊の発生限界：30 年程度前に種々の実験的検討→その後、あまり行われていない。今日的な知見（水理学・地盤工学）と実験装置で改めて検討することが重要【１９】

③ 変状の発達：脆性・延性と進行性破壊：破堤に至る現象とそうならない現象の違い、見分け方、現象表記（式）、評価

・ 土質、水位等を系統的に変えた大規模実験：泥濘・流動によるのり面欠損はあるところで欠損部の拡大が止まり、大きな損傷に至らなかった。この程度で終わる現象と破堤に至るまで進行する現象に分かれる条件は？その評価が可能ならば、生じうる損傷の重篤度という観点から補強の優先順位付けができる【１】

・ 降水の浸透が主たる外力であるすべり破壊：本当に生じうるのか、降水量と損傷の有無に関する既往データと計算条件・結果を比べる最低限の検証の必要性。仮に生じるとして、堤防中央部の浸潤面が低いので、天端を大きく欠損する崩壊に至りにくいのでは？【９】

・ 理論的には、たとえ変状が生じるとしても、浸透破壊の進行が鈍くて小規模な欠損で一出水を耐えきれるならば、補強の優先度を下げてよいと考えられる。そのような発生条件、また欠損が生じても安全と見なせる堤防断面を進行性破壊に関する地盤工学的手法を突き詰めていく【１０】【１３】

④ 現象解明・危険の事前察知：点検・モニタリング手法、蓄積したデータ分析のさらなる工夫

・ 現場での観測の継続、堤防区間ごとの既往出水による「水位・降雨量別・経験日数」などのデータ整理と点検結果（変状の有無など）との突き合わせによる「症歴」の分析【３】【１３】

・ 矢部川の基盤浸透による破堤を見据えた管理：基盤浸透から破堤に至るのはごく稀、噴砂から破堤に至るまではそれ相応の時間がかかるのでは、といったどこかに潜んでいたパイピングへの認識の見直し。事前に危険箇所を検知することの重要性。厚さ 1m 以下でパッチ状に分布する砂質土層を効率よく検知する技術および「症歴」の分析手法【６】

地盤工学委員会堤防小委員会「浸食・浸透破壊・洗掘 WG」＋水工学委員会河川部会「堤防 WG」

第 4 回合同会議　議事録（案）

日　時　：　2014 年 1 月 15 日（水）15:00～17:30
場　所　：　（社）土木学会 D 会議室
出席者　：　[浸食・浸透破壊・洗掘 WG]
前田，佐々木，坂本，小高，高橋，杉井，石田，丹下，藤本，與田，李
[堤防 WG]
服部，溝口，三戸，阿部
［オブザーバー］
泉，森，岡本　（敬称略）

■議題

１．前回議事録確認
２．浸透破壊紙芝居に関する講演
３．浸透破壊プロセスの理解に向けた意見交換
４．今後の予定

■配布資料

・前回議事録
・浸透破壊紙芝居作成プロジェクト Ver.0

■議事内容

１．はじめに

・服部リーダーより、本日の会議は、前回整理した課題のうち「現象解明・危険の事前察知」につなげていくために、絞って議論していきたい、との趣旨説明があった。

２．浸透破壊紙芝居に関する説明

・前田先生より、浸透破壊に関する紙芝居の内容について説明していただいた。
・冒頭、紙芝居は、前田先生、杉井先生、小高先生とで議論して作成し、李さん、石原さん、森さんからも意見をいただいたことについて紹介があった。
・また、作成に当たっては、統一的な説明を目指したこと、土塊としての安定性を考慮したこと、浸透破壊・せん断破壊・パイピング・内部侵食・盤ぶくれなどの現象を関連付けることに配慮したことについて前置きがあった。

３．浸透破壊プロセスの理解に向けた意見交換

(1)　流動破壊のメカニズムについて

・浸透破壊の形態について、「融ける」という言い方は誤解を与えるようなので、流動破壊という言い方に替えた。泥濘化という言い方もある。
・p.21 の図について、せん断応力は有効応力の減少とともに原点に向かうと考えたほうがよいのではないか。

・表面の粒子が動くためには表層でも過剰間隙水圧が働いていると考えられるが、浸透流計算等では説明できない。
・表面の水圧は零でも、少し内側では水圧が作用しているので、それによって粒子は動くのではないか。
・土塊の強度を上回るような透水力が作用する前に、過剰間隙水圧の上昇によって、土塊としての崩壊（液状化）が生じると考えられる。崩壊の大きさは粘着力の増加とともに大きくなる。
・破壊が進行する現象を理解するためには、崩壊した土が流出水によって流される現象も合わせて考える必要がある。
・過剰間隙水圧は動水勾配の概念で考えたほうが理解しやすい。
・p.8 の間隙水圧の式は次元が合わないので修正が必要（たとえば $i\gamma \rightarrow i\gamma d$）。
・マサ土のように締固めが容易な粒度分布を持つ材料は簡単には崩れず、崩れるときは大きく崩れる。
・融けるといっても局所的にはすべっている。すべった後に崖ができるのは、サクションが急激に働いて見掛けの粘着力が出てくるためである。
・崩れるかどうかは土質とのり勾配で決まると考えられる。

(2) パイピング破壊のメカニズムについて

・水圧が上昇してから被覆層が持ち上がり、水が噴き出した後までの有効応力の変化については理解が難しい部分も多く、さらに検討が必要である。
・噴いた後に、パイピングが進むかどうかが重要である。
・実験では豊浦砂は進行しないが、２種類の粒径を混合した砂は進行する。進行するものは、粒子が移動した先で詰まってそこで動水勾配が大きくなる。
・漏水によってガマができる場合とできない場合があるが、どのように理解すればよいか。
・粒子が動く→間隙に詰まる→動水勾配が大きくなる→土塊が動く、といった現象が繰り返されることによって起きると考えられる。
・流速で動くかどうかだけでなく、移動できる間隙があるかどうかが重要。実験では、下に凸の粒度分布をもつ土は細粒分が抜けやすいことが確認されている。

３．今後の予定

・河川分野の人にとっては、有効応力とせん断力がどうつながるかが理解しにくい。次は、河川工学を専門とするメンバーに流体力学の観点で作成していただく。
・次回は３月初旬に開催する方向で後日日程調整する。

以上

浸透破壊紙芝居作成プロジェクト Ver.0

Ver.0：浸透破壊プロセスの理解に向けてのキックオフ，
地盤力学的観点を主体として

1

作製にあたって（１）

- 統一的な説明を目指して，原理は極力少なく，場合分けの数を増やさない.
- 土塊としての安定性を考慮する（せん断強度，過剰間隙水圧・有効応力の増減，液状化状態，液状化による流動など）.
- 浸透破壊，せん断破壊，パイピング，内部侵食，盤ぶくれなどの現象を関連付ける.

2

作製にあたって（2）

	有効応力	間隙比	過剰間隙水圧（液状化の程度）	強度定数	粒径	流速
すべり破壊（せん断破壊）						
動水勾配（透水力）						
内部侵食						

3

シナリオ（一時的に設定）

1. いわゆる浸透破壊（すべり破壊との統合）
    a. 漏水がきれいな場合
       （融けるような破壊とすべり破壊との違い）
    b. 漏水が濁っている場合
2. 高い透水性の基礎地盤を有する堤体の破壊（いわゆるパイピング破壊）
    a. 被覆層がない場合
    b. 被覆層がある場合

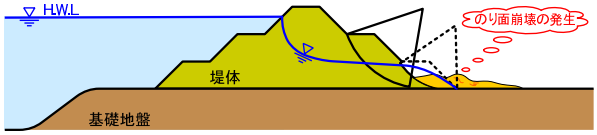
*破壊進行後の越流：今回は描いていない

4

堤体浸透，すべり～越流： 進行する変状

STEP1

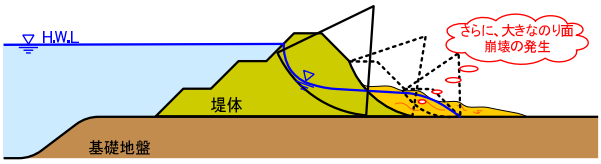
【堤外】 【堤内】



堤体内水位の上昇による堤体の強度低下により、小規模なのり面崩壊発生

STEP2

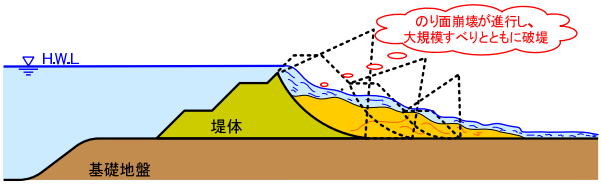
【堤外】 【堤内】



小規模なのり面崩壊が発生したため、堤体の安定が損なわれ、中規模なのり面崩壊が発生

STEP3

【堤外】 【堤内】

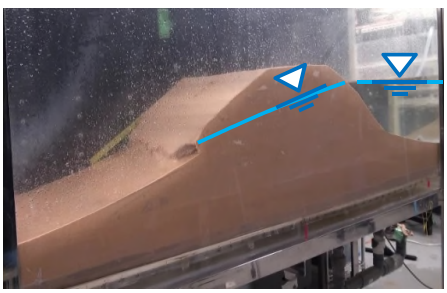


のり面崩壊が除々に進行し、大規模すべりの発生とともに破堤

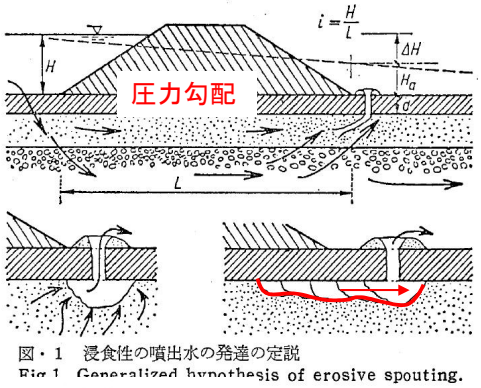
国土交通省資料

5 2 1

“すべり”と“融ける（流動）”



浸透破壊を様々なスケールの視点と応力状態で考察してみる:“液状化（有効応力を失う）”

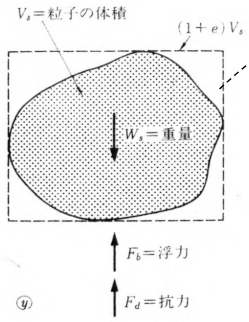


長瀬，応用地質技術年報，1978

図・1　浸食性の噴出水の発達の定説
Fig.1　Generalized hypothesis of erosive spouting.

！変形（せん断）すると？
！粒子が動くと？

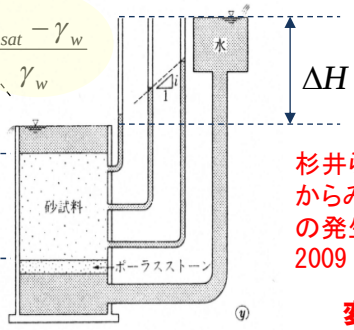
吉見吉昭，砂地盤の液状化（土質基礎シリーズ），1991



$$F_s = \frac{i_{cr}}{i} = \frac{\dfrac{G_s - 1}{1+e}}{\dfrac{\Delta H}{L}}$$

$$\frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w}$$

一次元のつり合い問題であれば，結びつく



杉井ら，限界流速からみた浸透破壊の発生と進行，2009

変状は，$i < i_{cr}$で起きる？

土粒子レベルの視点 ⟷ **土要素としての視点**

有効応力

$$p' = p - u$$

$$\tau' = \tau$$

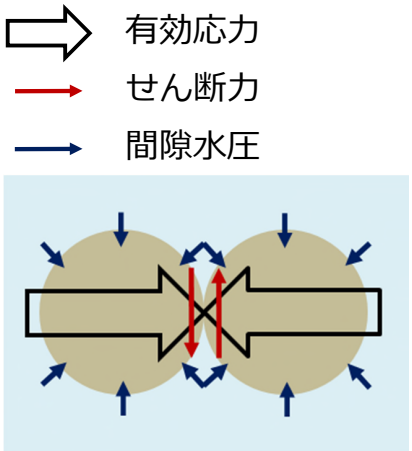
圧密応力（土を頑張らせる応力）

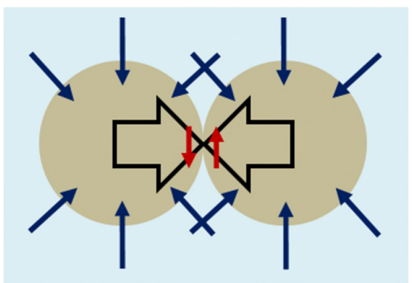
せん断応力（土を壊す応力）

有効応力（土粒子骨格）　全応力（全体のつり合い）　間隙水圧

$$u = u_s + u_e = u_s + i\gamma_w$$

静水圧　過剰間隙水圧

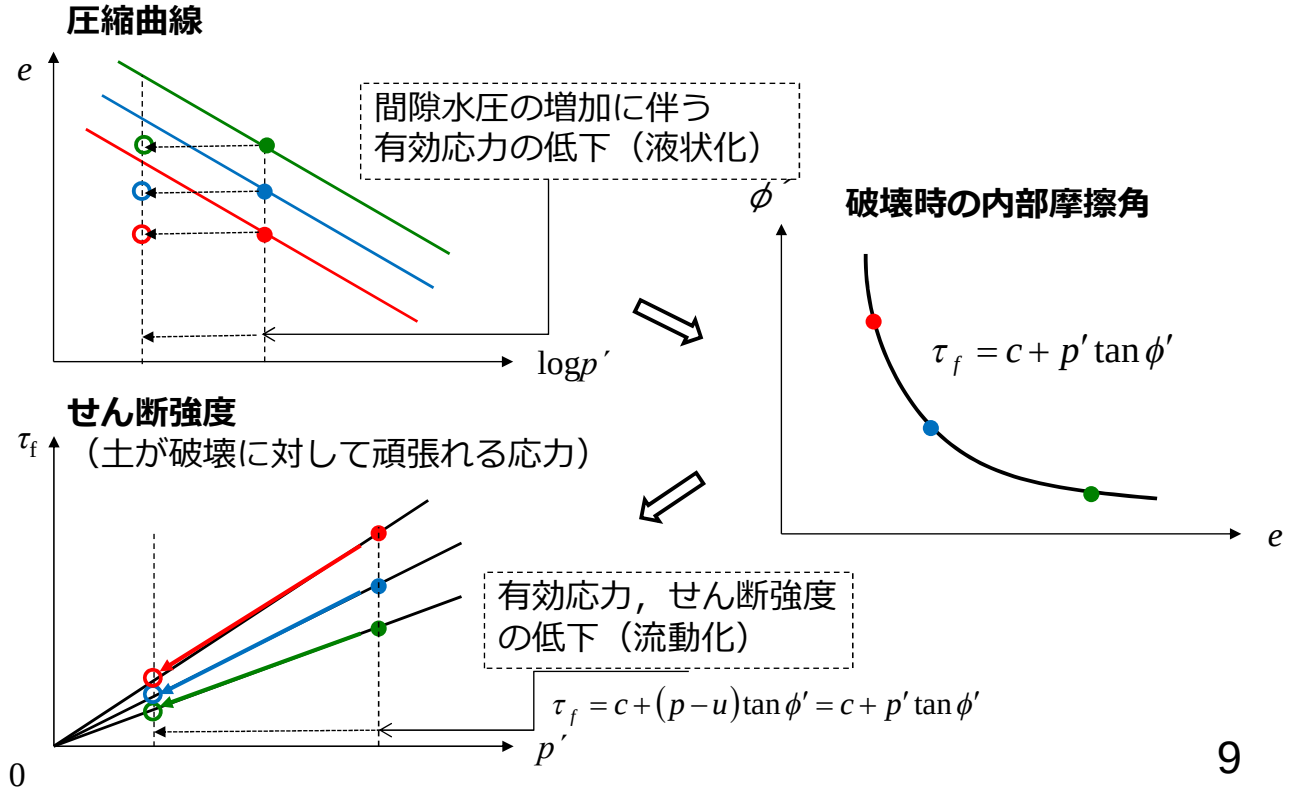




$$\tau_f = c + (p - u)\tan\phi' = c + p'\tan\phi'$$

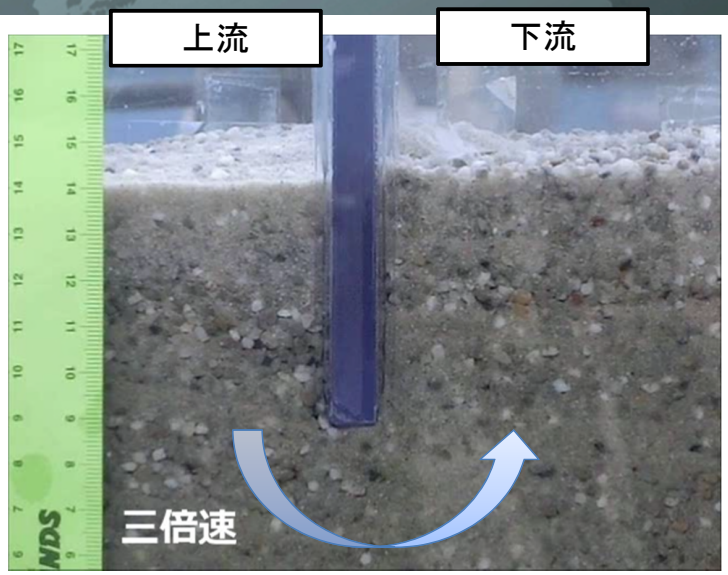
せん断強度（土が破壊に対して頑張れる応力）

有効応力とせん断強度



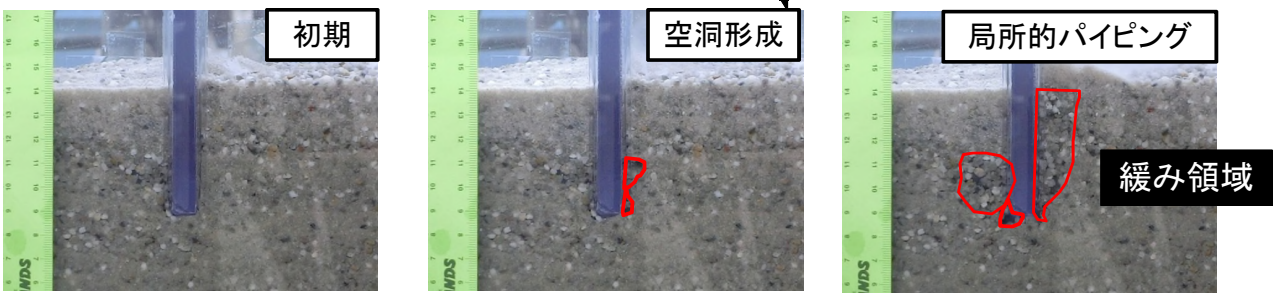
9

矢板周り：漏水が濁る実験（内部浸食しやすい粒度）



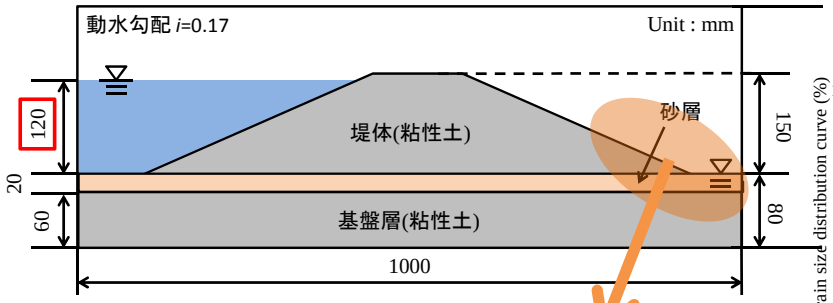
i/i_{cr}

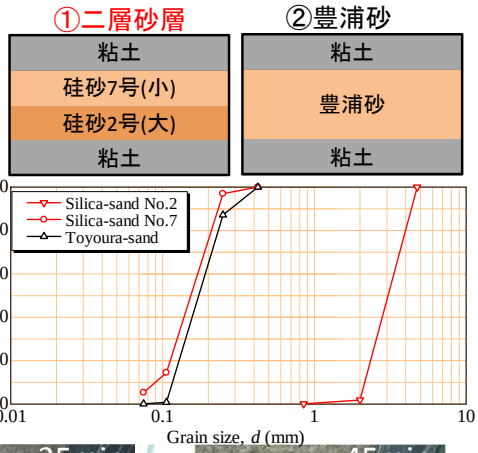
0.72	砂煙発生
0.77	下流側に空洞形成
0.91	更に細粒分が移動
0.96	空洞形成
1.0	空洞崩壊
	上部に空洞形成
	局所的パイピング
	浸透破壊



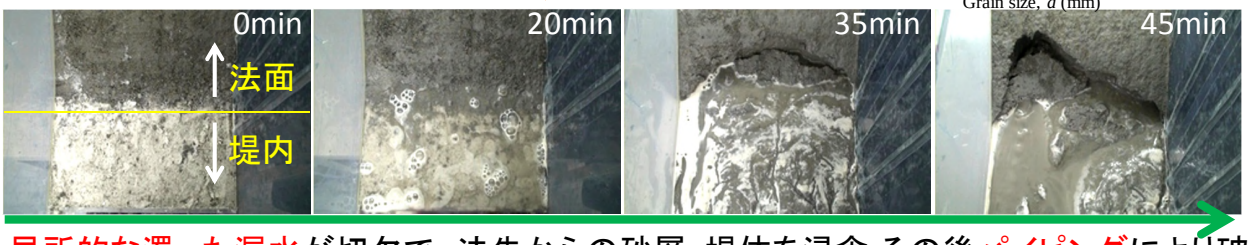
内部浸食による細粒分の流出が、下流側から上流側へと進行していく様子が確認できる

堤体模型実験の結果





① 二層砂層　硅砂2号　硅砂7号

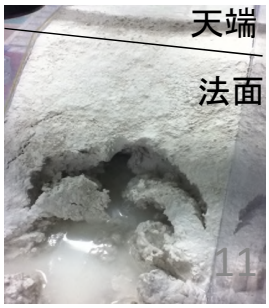


局所的な濁った漏水が切欠で、法先からの砂層・堤体を浸食.その後パイピングにより破堤.

② 豊浦砂

内部侵食しない豊浦砂では，漏水しても，堤体の法先に掘削しても破壊しない

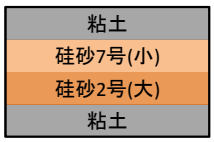
微小な変形は見られるが、破堤には至らない.



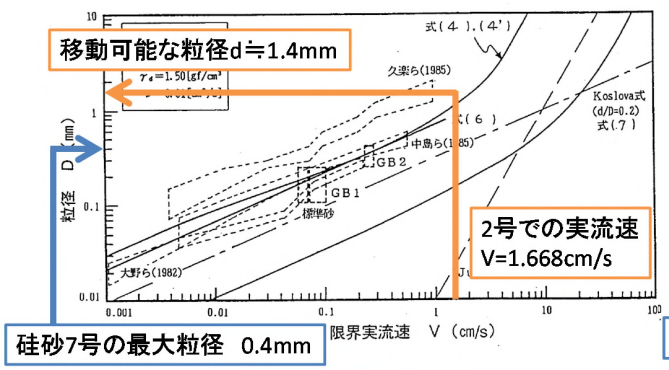
粒径Dと限界実流速Vの関係(堤体模型実験)

壊れた砂層

硅砂2号と7号の二層砂層



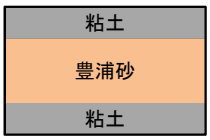
試料名	透水係数 (cm/s)	i=0.2における実流速(cm/s)	最大粒径 (mm)
硅砂2号	8.34	1.668	4.0
硅砂7号	4.38×10^{-3}		0.4



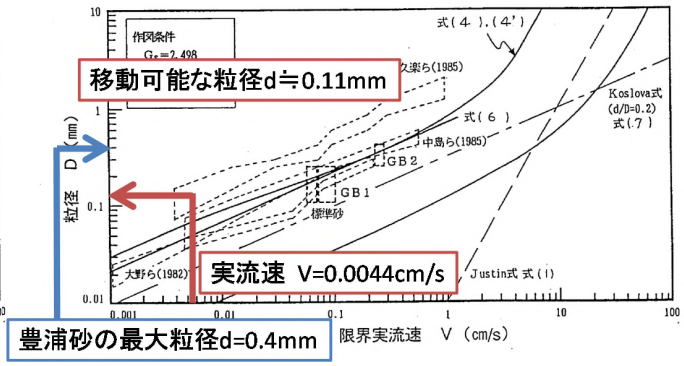
浸透流速 ＞ 最大粒径の限界流速

壊れない砂層

豊浦砂



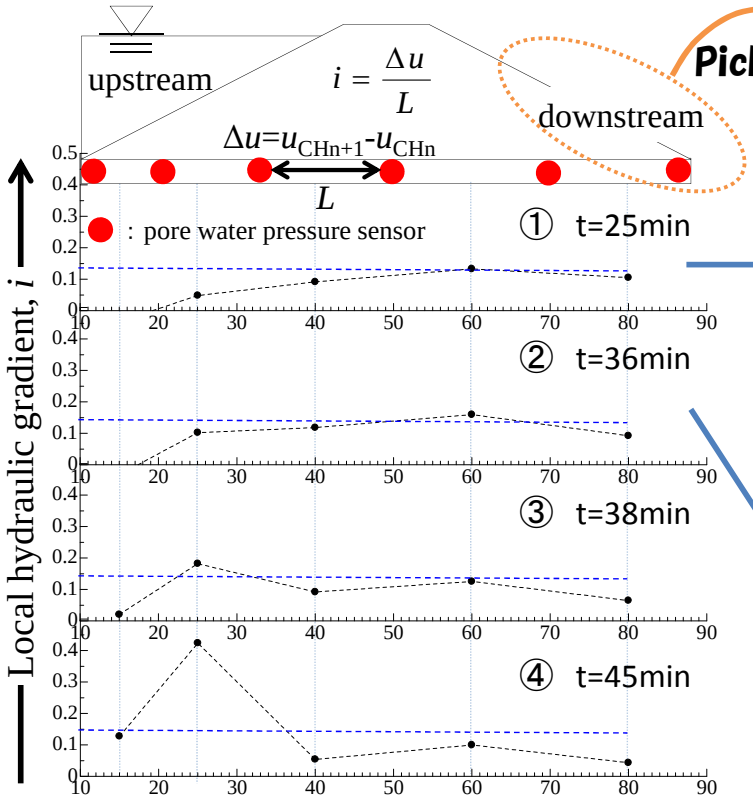
試料名	透水係数 (cm/s)	i=0.2における実流速(cm/s)	最大粒径 (mm)
豊浦砂	2.2×10^{-2}	4.4×10^{-3}	0.4



浸透流速 ＜ 最大粒径の限界流速

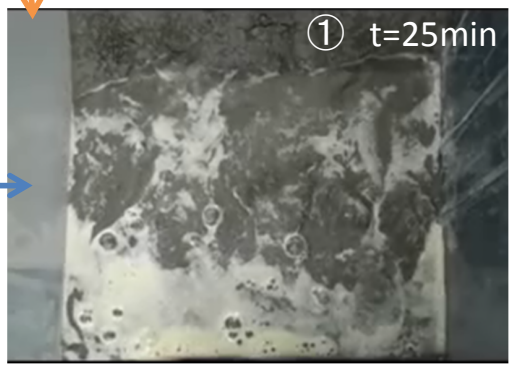
→ **粒径の揃った**砂層は**破壊しにくい**.
粒径差が大きく、細かい砂の**限界流速より速い浸透流速**が破壊に至る必要条件.

局所的(計測器間)動水勾配の変動



Pick up!

実験時の堤内側の様子(2倍速)

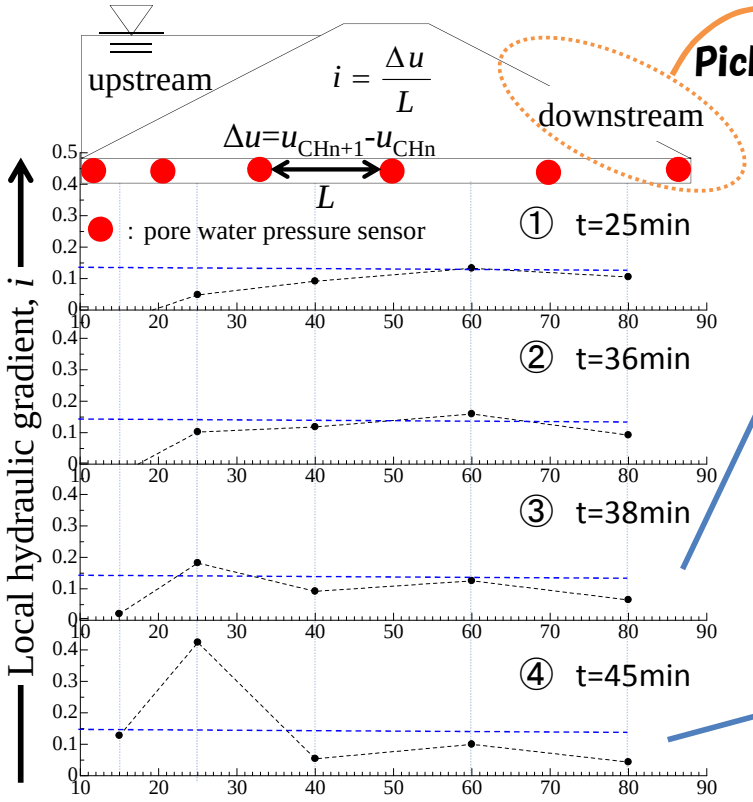


砂層からの浸透により徐々に浸食

局所的な漏水の様子 (画像左側)

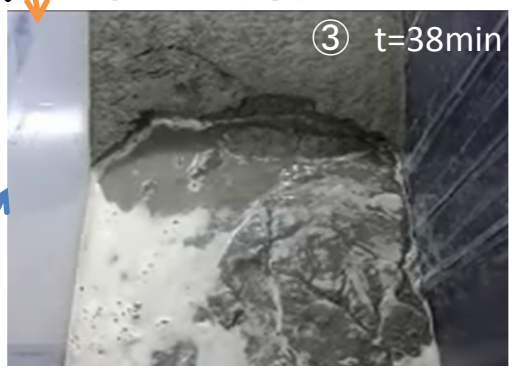
①, ②: 全体的に動水勾配が上昇。 砂層・堤体が徐々に浸食。 → 漏水が局所化。

局所的(計測器間)動水勾配の変動



Pick up!

実験時の堤内側の様子(2倍速)

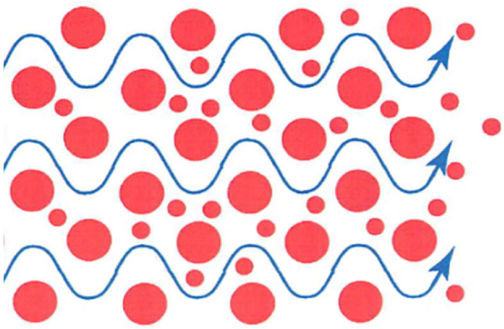


漏水箇所の流量増加 法面の滑り

さらに流量増加 → 破堤に至る

③, ④: 堤外側の動水勾配が著しく上昇。
→漏水箇所の流量が増加 → 破堤

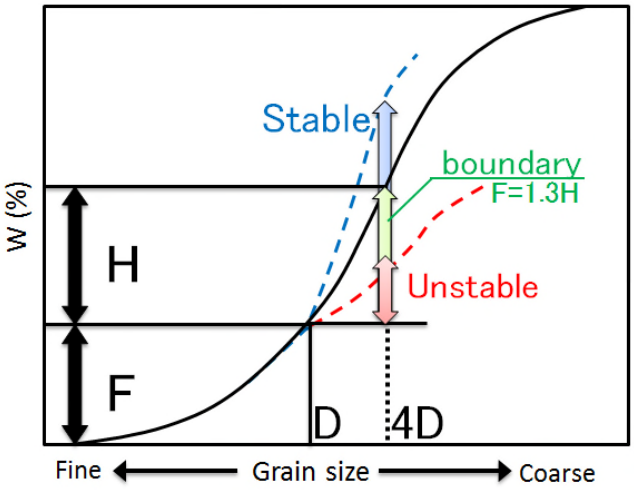
フィルター材に関する粒度分布に関する基準



●移動出来る間隙径の存在

●外力（浸透力）の作用

●周辺粒子との接触力が小さい
（粒子間構造を主だって構成しない）



流出に対して安定な条件
（Kenny et.al, 1985）

1, $D > \frac{1}{4} D_{Filter}$

流出可能粒径Dはフィルター最小粒径の1/4

2, $H > F$

フィルター粒径が流出粒径の同量以上含有

シナリオ（一時的に設定）

1. いわゆる浸透破壊（すべり破壊との統合）
   a. 漏水がきれいな場合
      （融けるような破壊とすべり破壊との違い）
   b. 漏水が濁っている場合
2. 高い透水性の基礎地盤を有する堤体の破壊
   （いわゆるパイピング破壊）
   a. 被覆層がない場合
   b. 被覆層がある場合

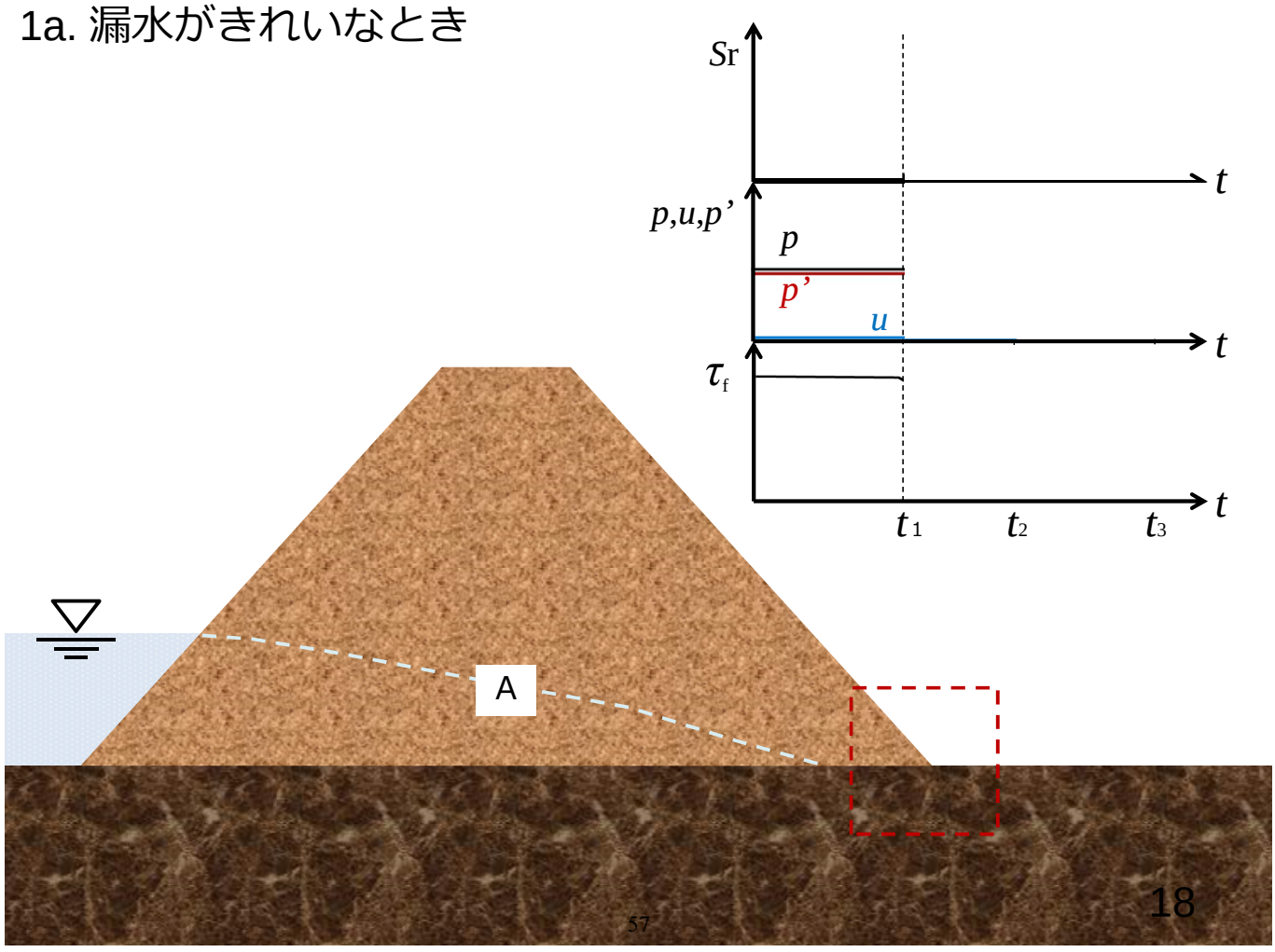
*破壊進行後の越流：今回は描いていない

1 .いわゆる浸透破壊
（すべり破壊との統合）

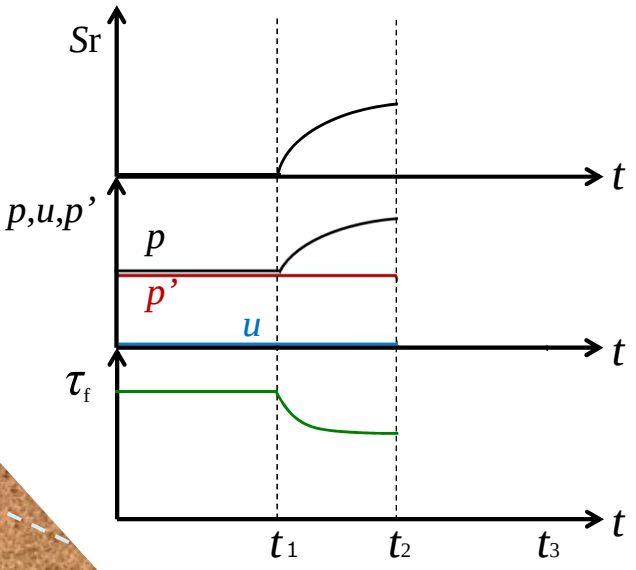
a. 漏水がきれいな場合

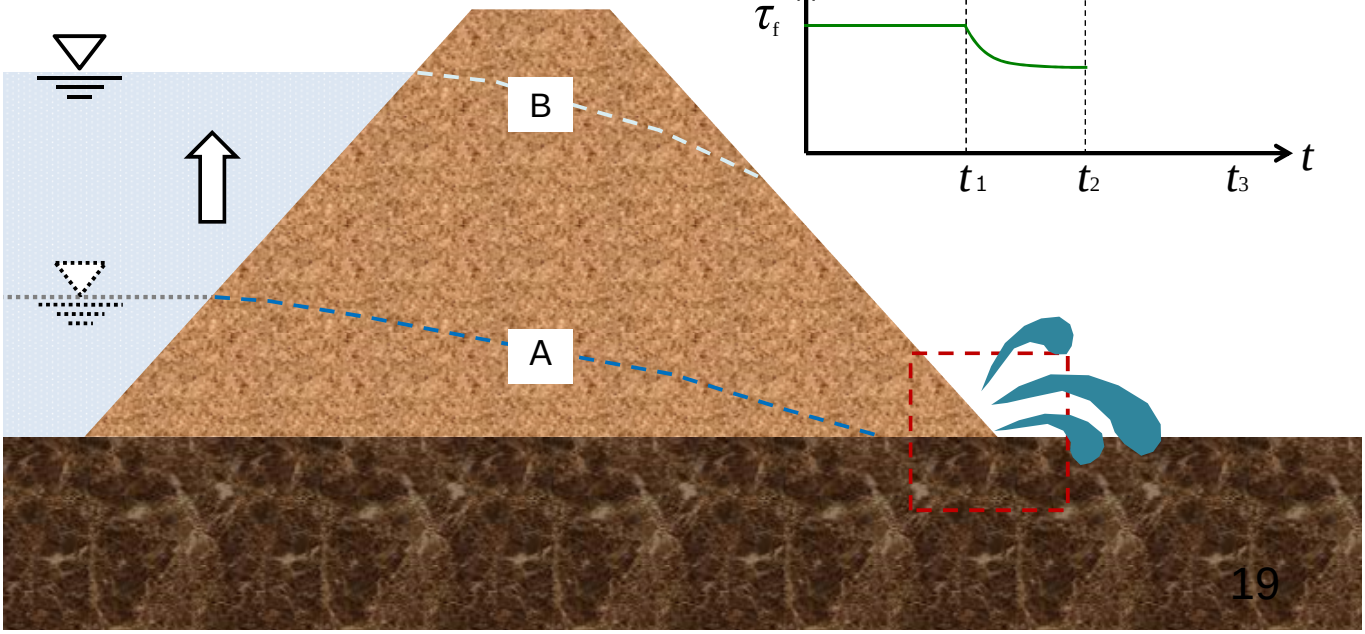
（融けるような破壊とすべり破壊の違いは材料特性の違いとして説明）

1a. 漏水がきれいなとき



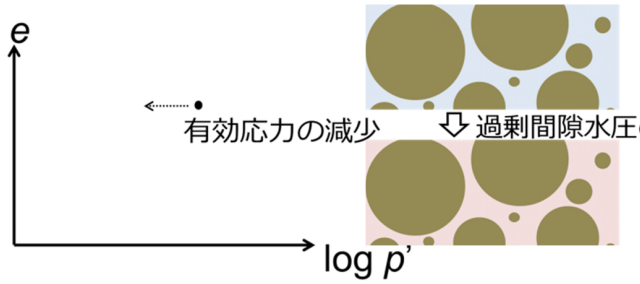
1a.漏水がきれいなとき

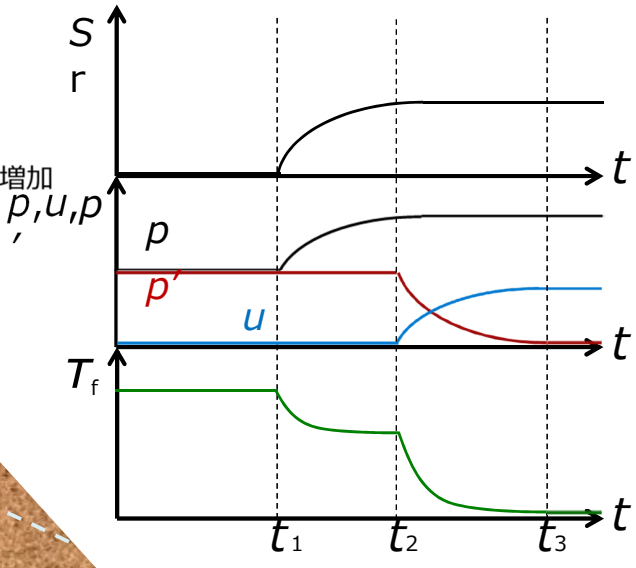


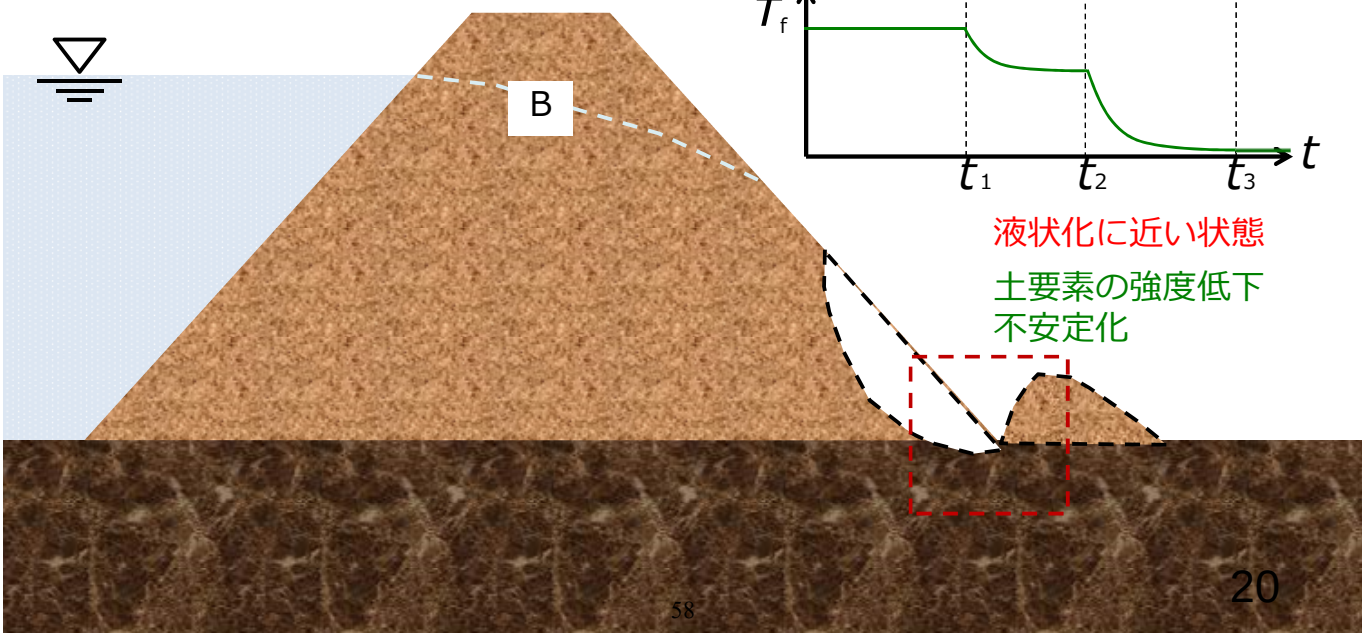


19

1a.漏水がきれいなとき

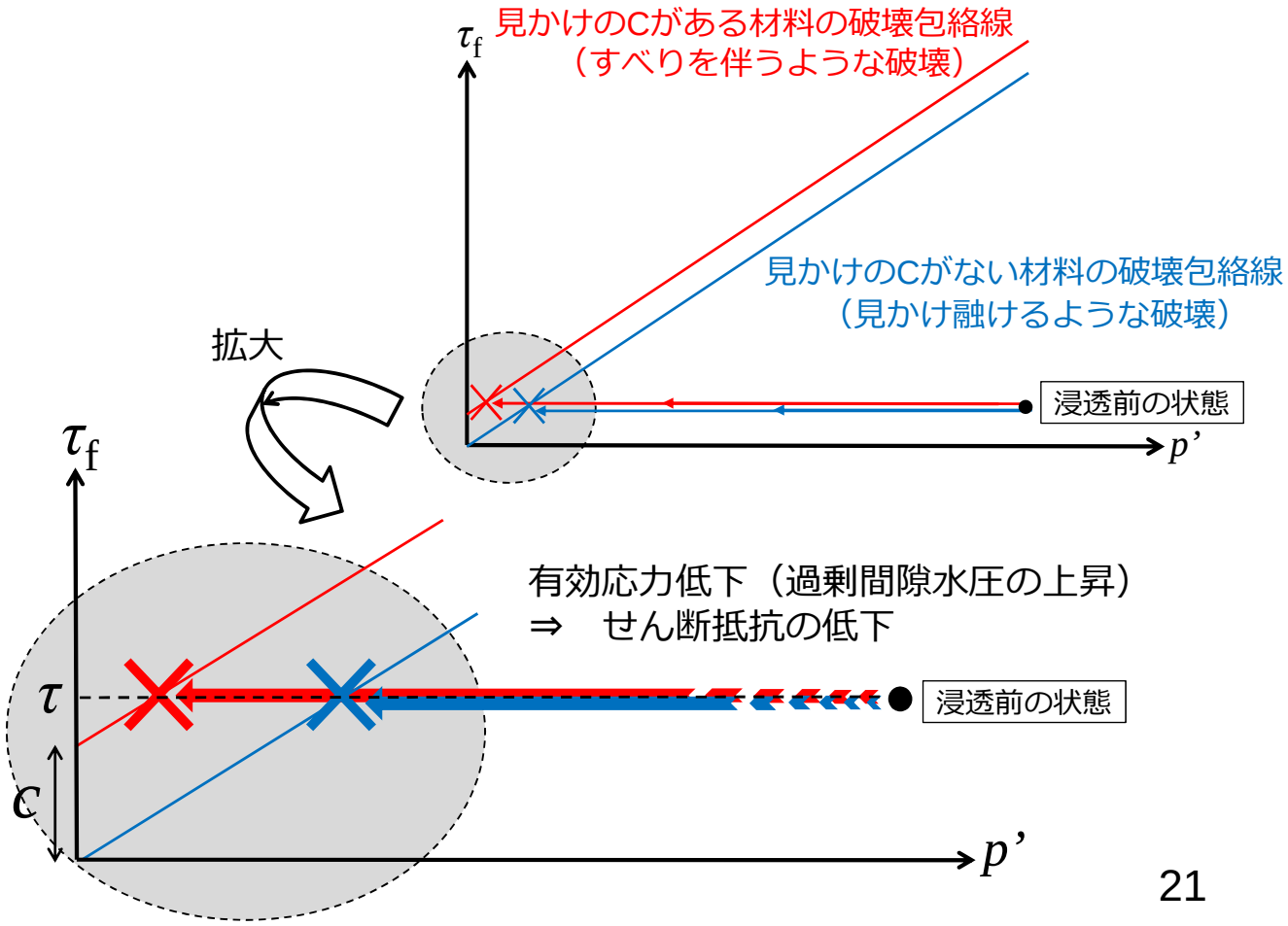






20

1a.漏水がきれいなとき



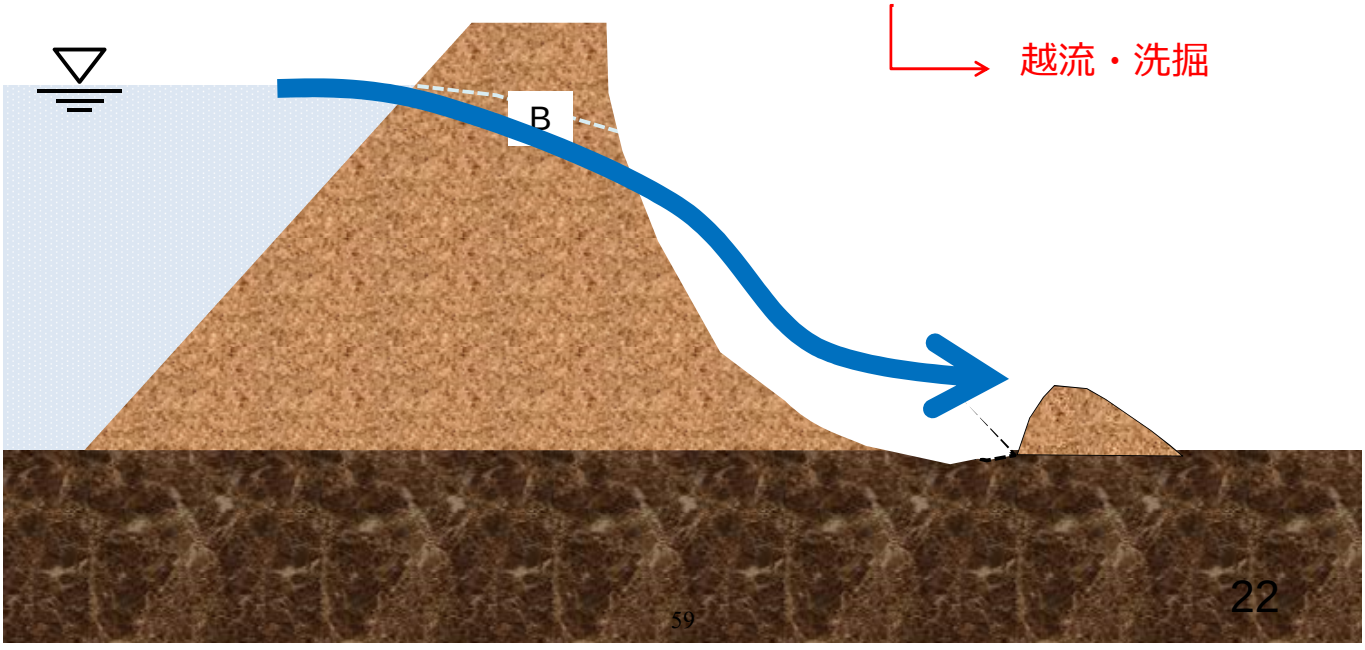
1a.漏水がきれいなとき（ガサッとすべる破壊）

見かけのCがあるような材料でできた堤体

→ 大きな土塊が
ガサッとすべって破壊する

→ すべりが連鎖する

→ 越流・洗掘

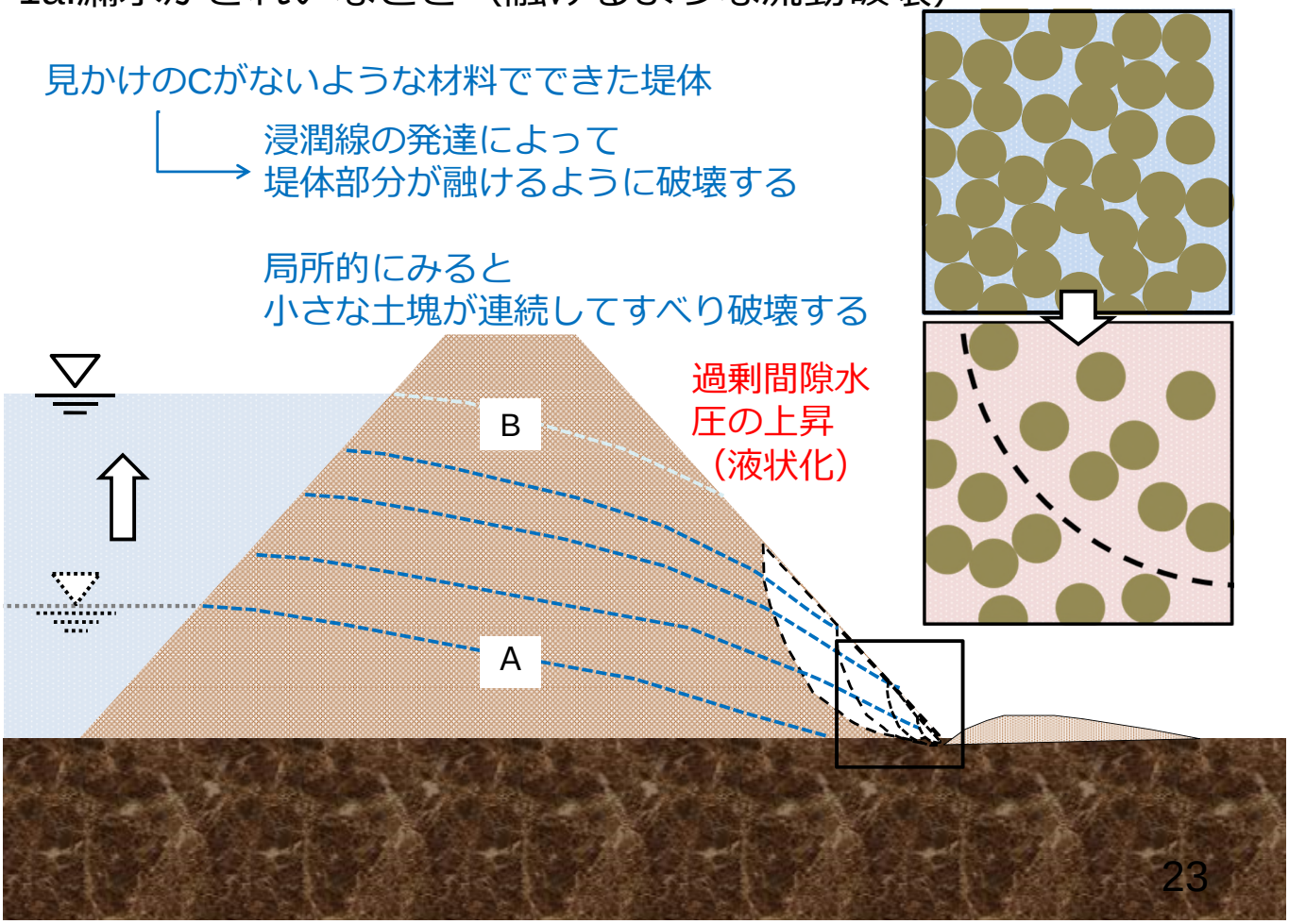


1a.漏水がきれいなとき（融けるような流動破壊）

見かけのCがないような材料でできた堤体

→ 浸潤線の発達によって
堤体部分が融けるように破壊する

局所的にみると
小さな土塊が連続してすべり破壊する



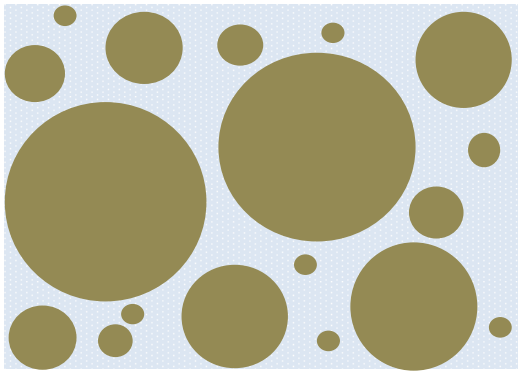
23

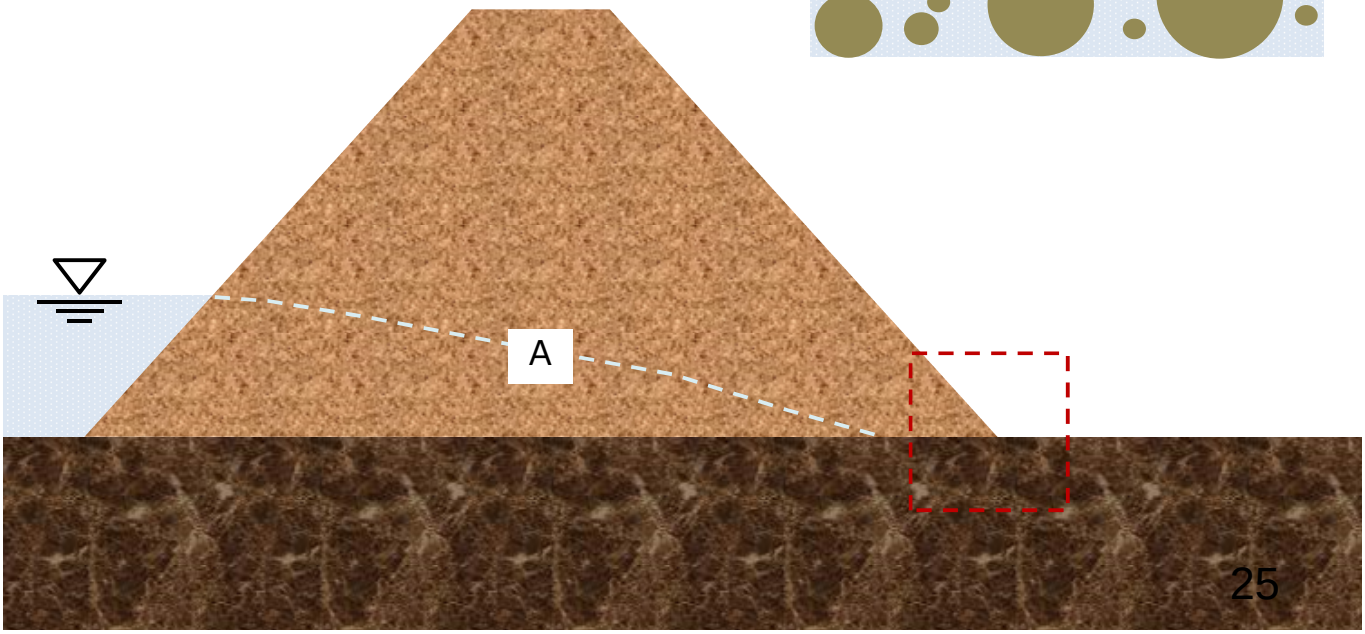
1.いわゆる浸透破壊
（すべり破壊との統合）

b. 漏水が濁っている場合（内部侵食）

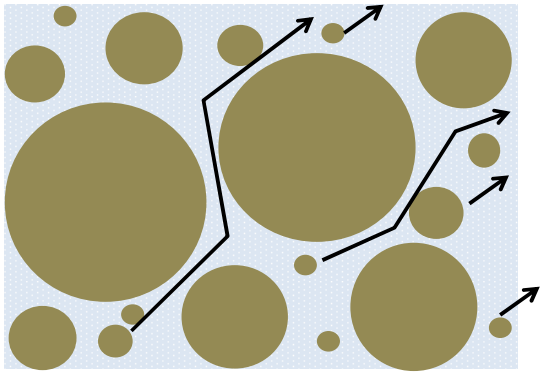
24

1b.漏水が濁っているとき

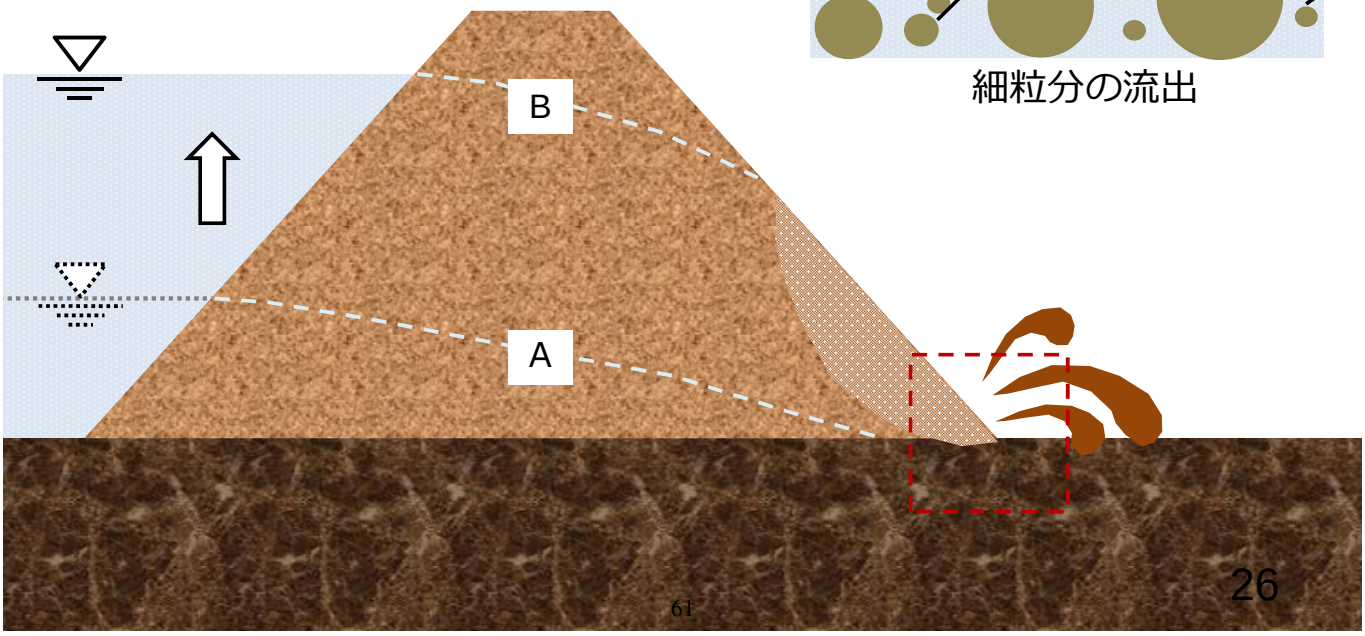




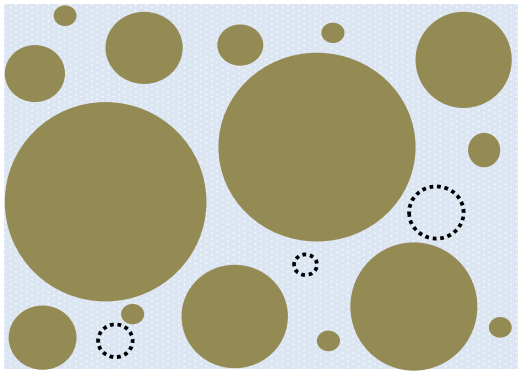
1b.漏水が濁っているとき

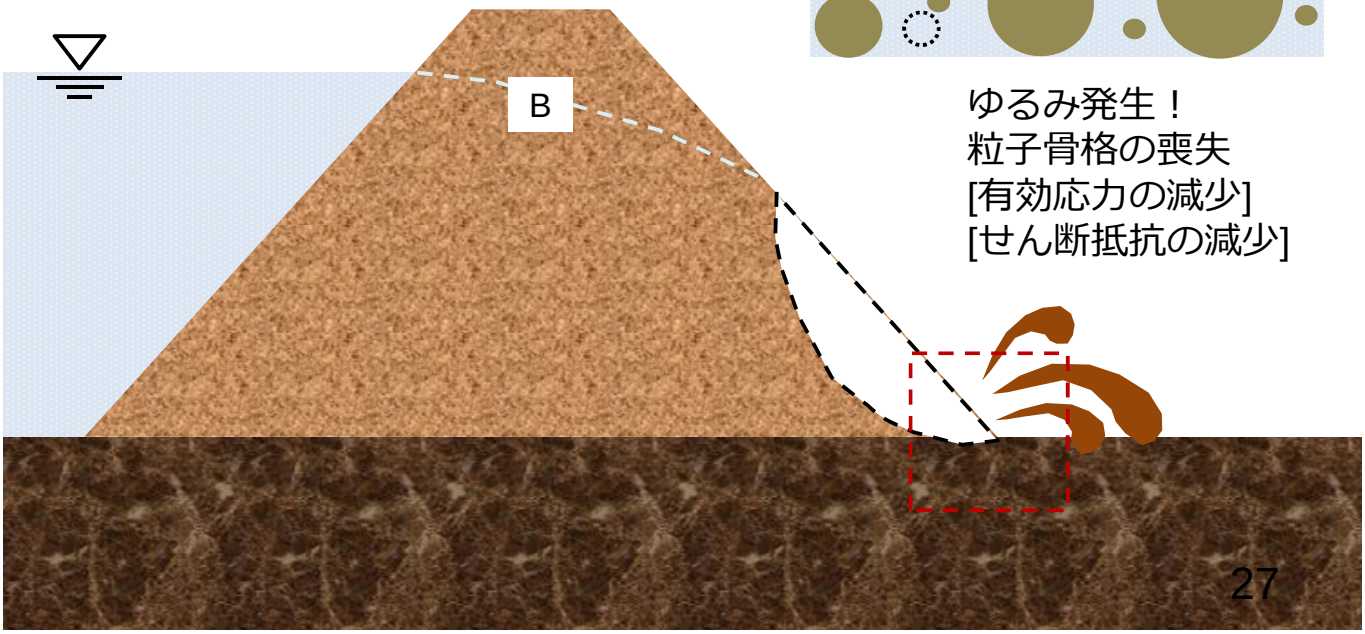


細粒分の流出



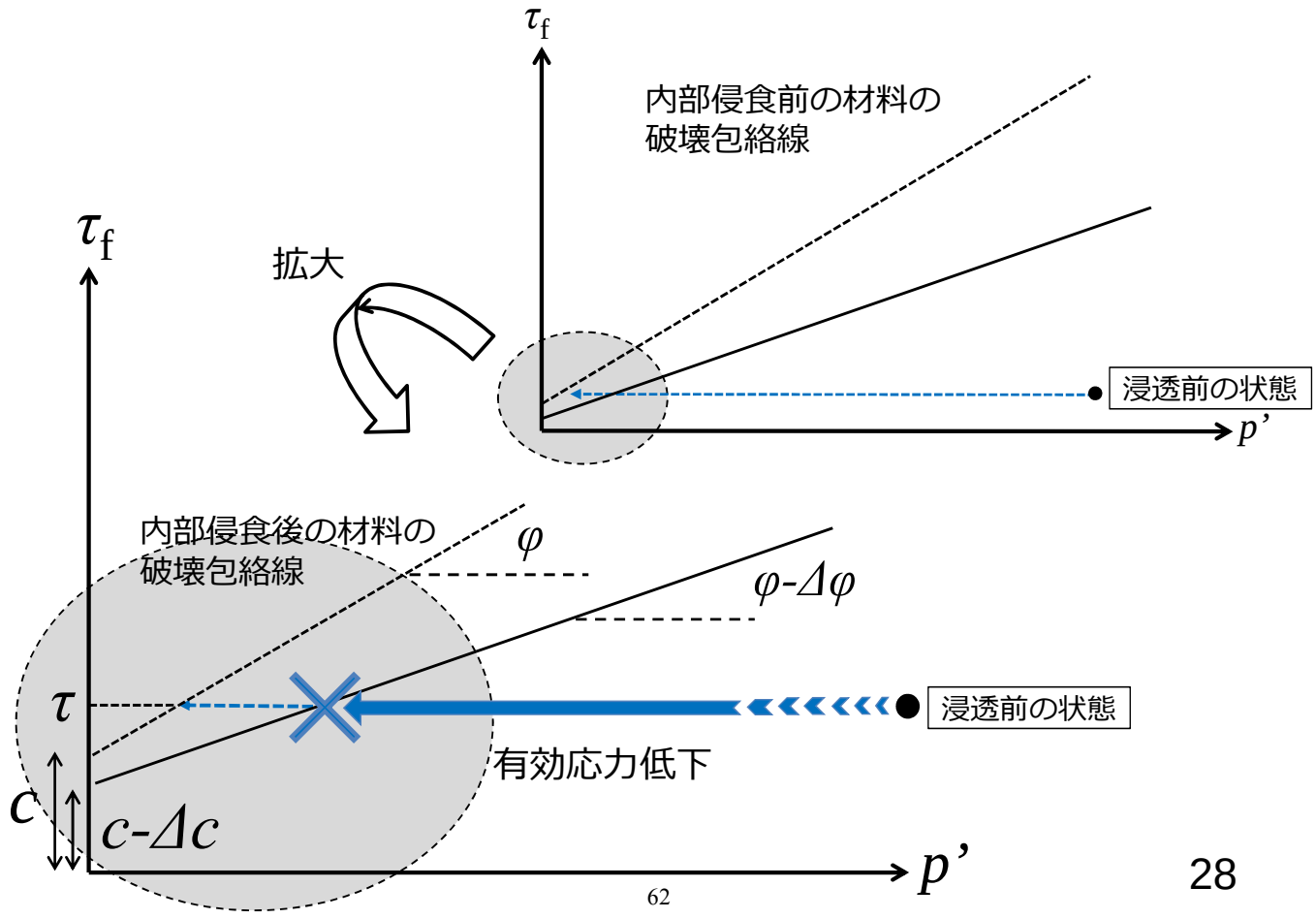
1b.漏水が濁っているとき





ゆるみ発生！
粒子骨格の喪失
[有効応力の減少]
[せん断抵抗の減少]

1b.漏水が濁っているとき



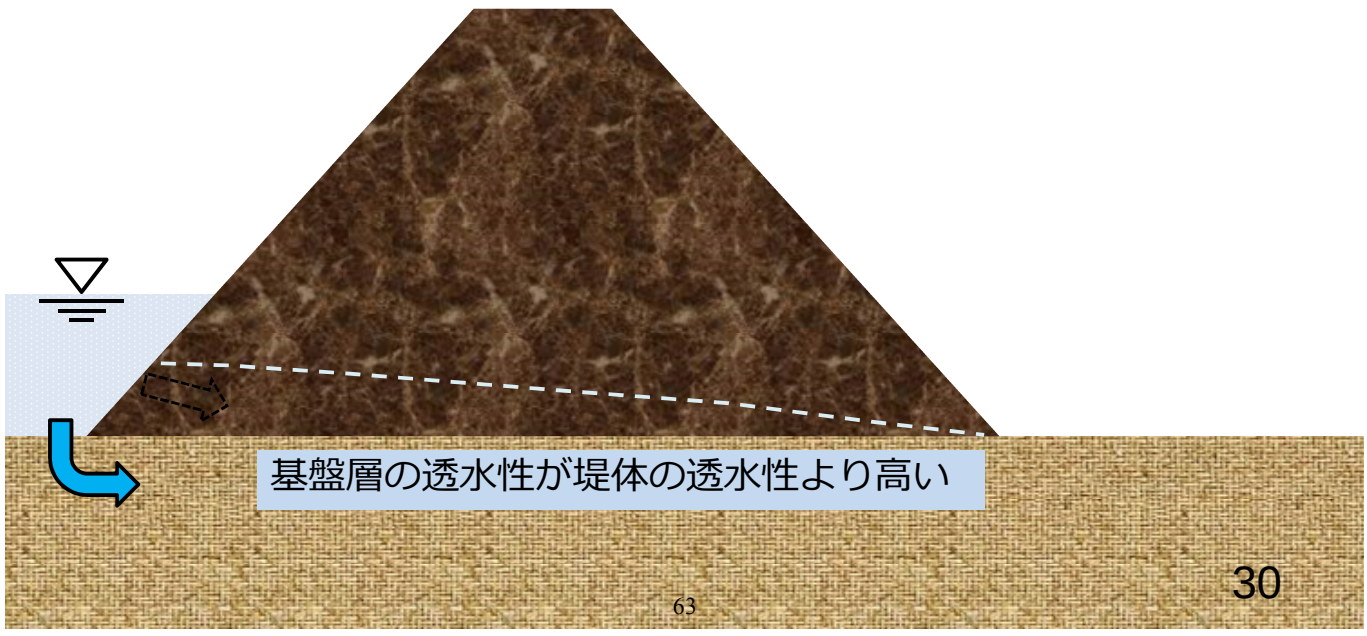
28

2.高い透水性の基礎地盤を有する堤体の破壊（いわゆるパイピング破壊）

a. 被覆層がない場合

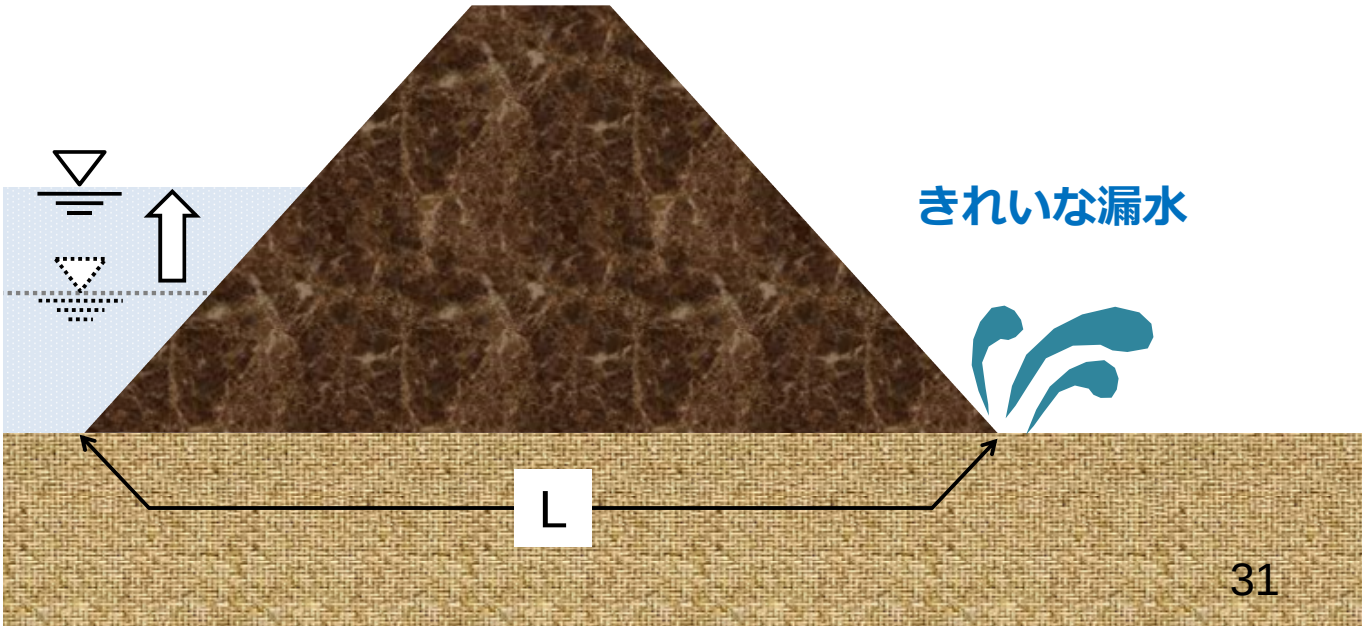
29

2a.基盤層の透水性が高い（被覆層無し）



30

2a.基盤層の透水性が高い（被覆層無し）

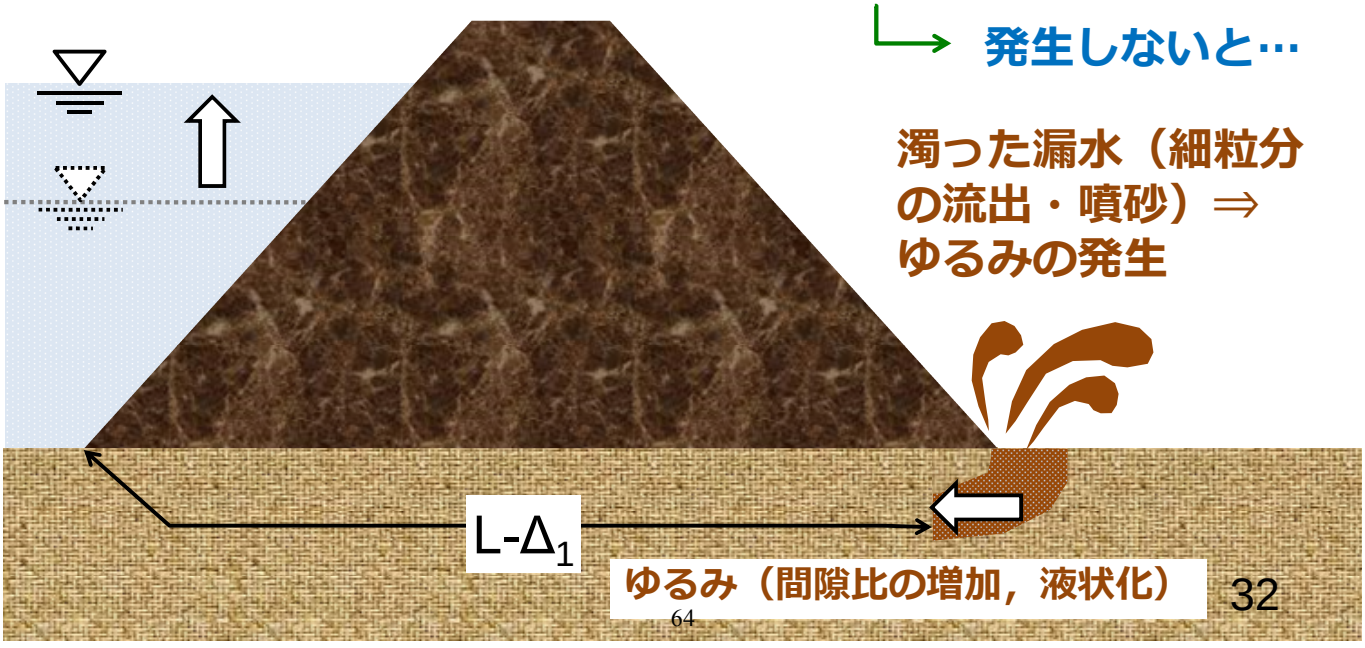


2a.基盤層の透水性が高い（被覆層無し）

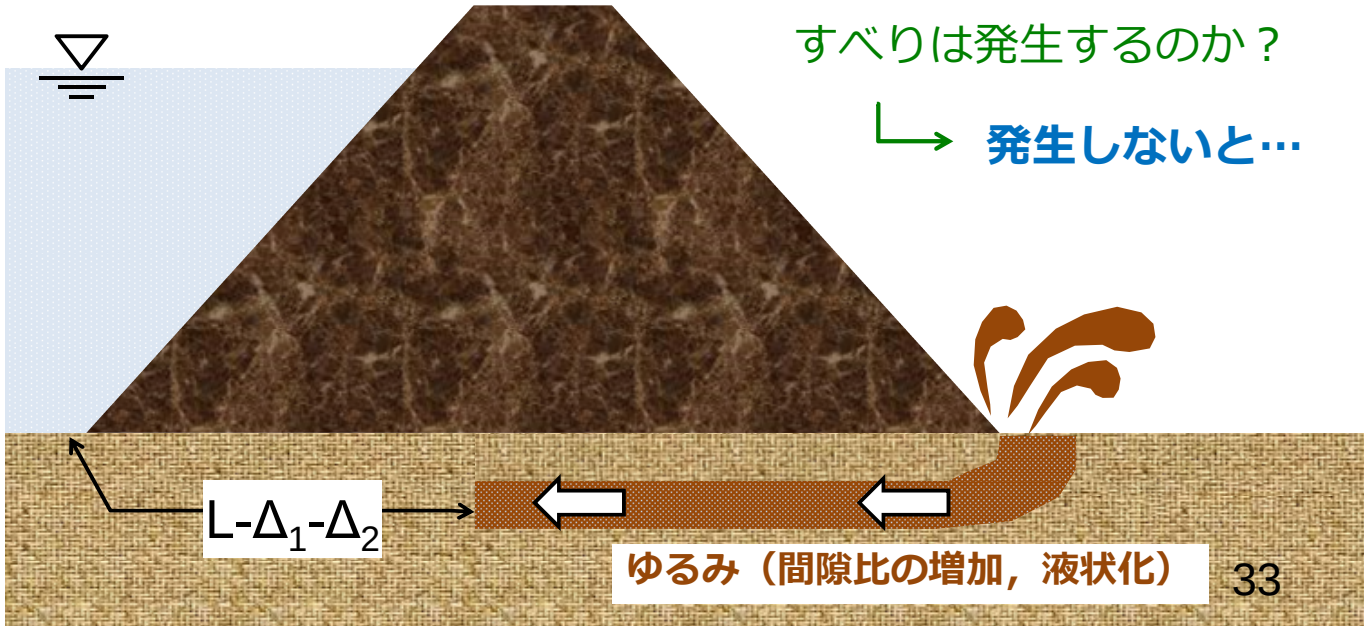
すべりは発生するのか？

→ 発生しないと…

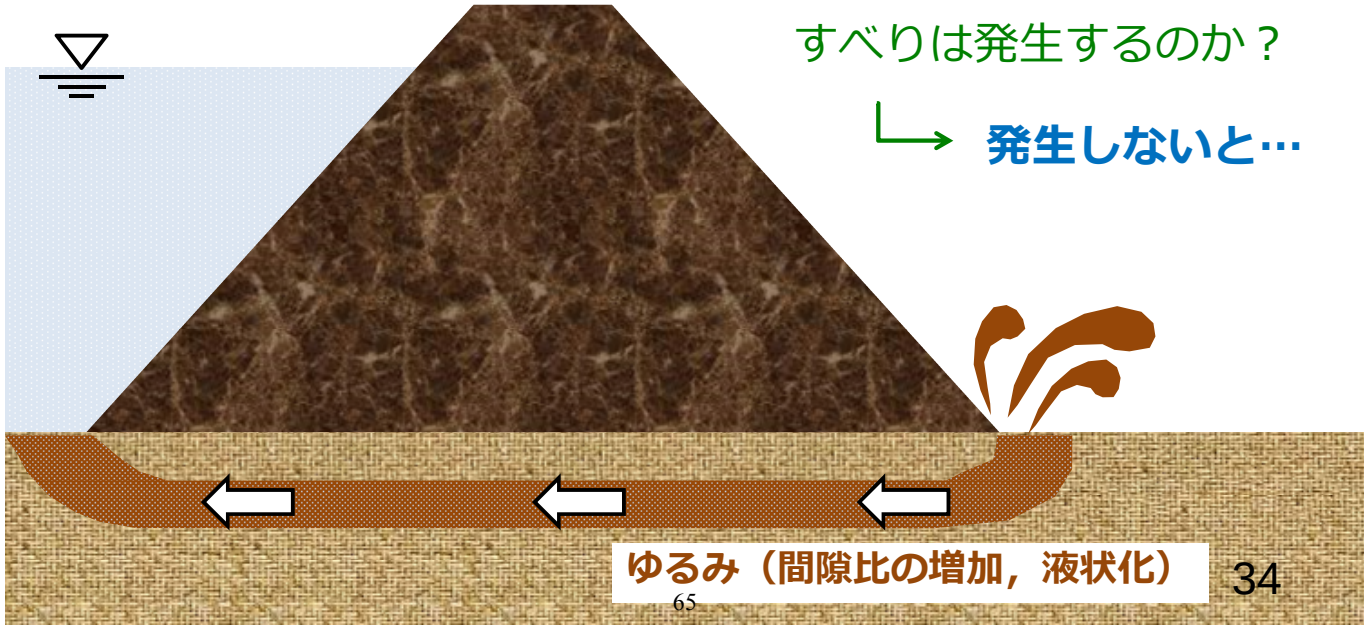
濁った漏水（細粒分の流出・噴砂）⇒ゆるみの発生



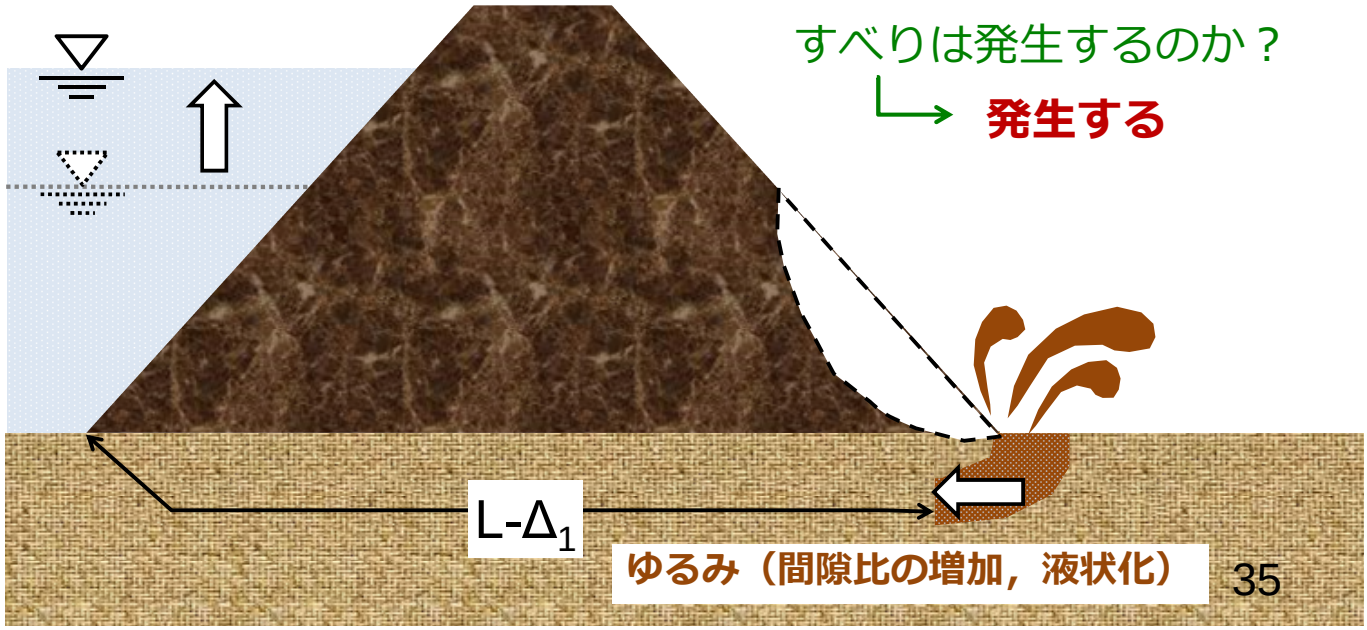
2a.基盤層の透水性が高い（被覆層無し）



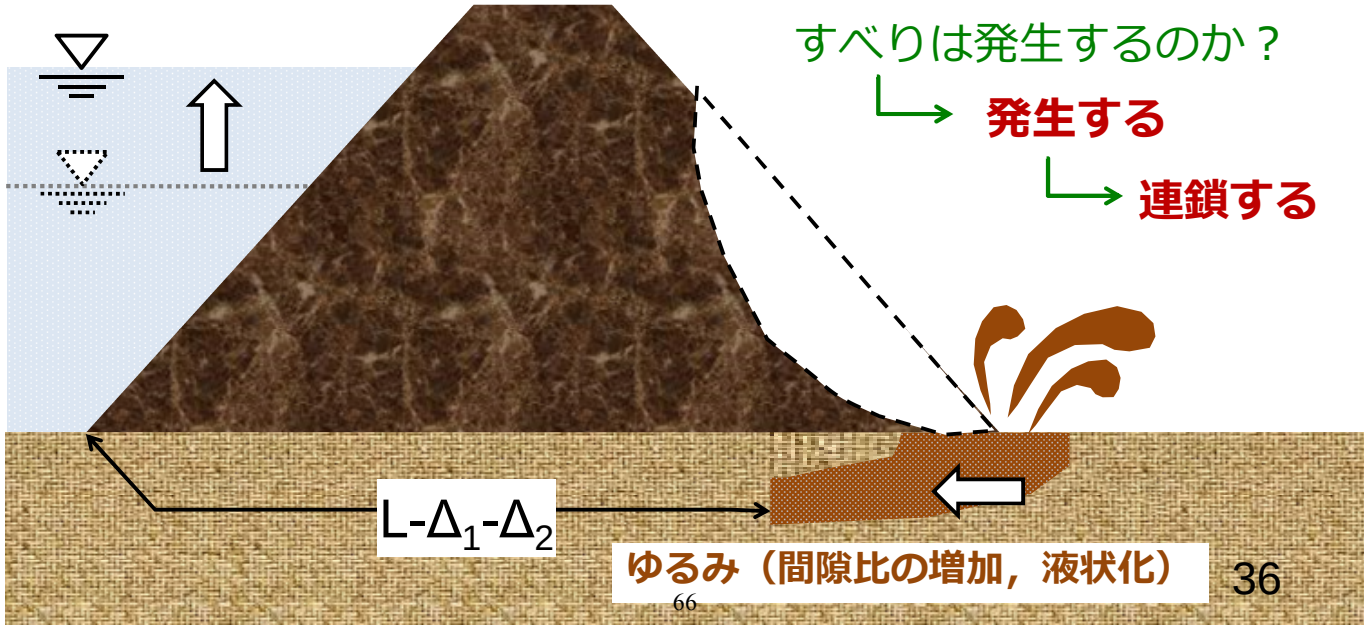
2a.基盤層の透水性が高い（被覆層無し）



2a.基盤層の透水性が高い（被覆層無し）



2a.基盤層の透水性が高い（被覆層無し）

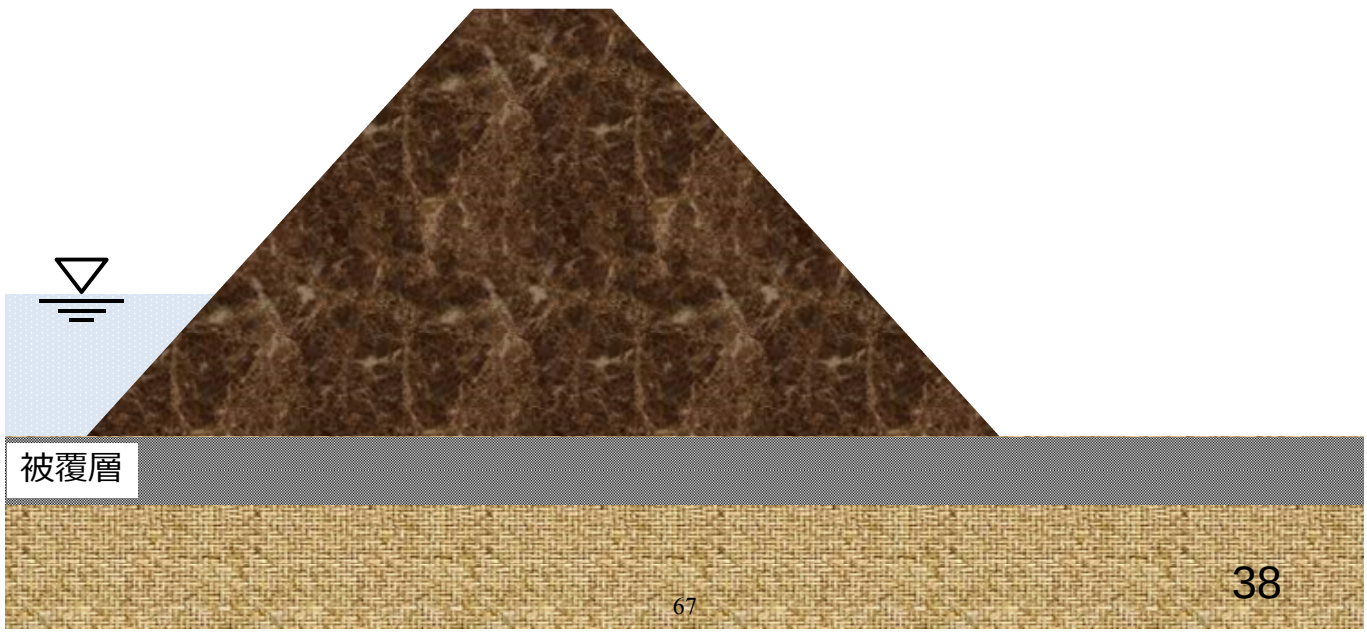


2.高い透水性の基礎地盤を有する堤体の破壊（いわゆるパイピング破壊）

b. 被覆層がある場合

37

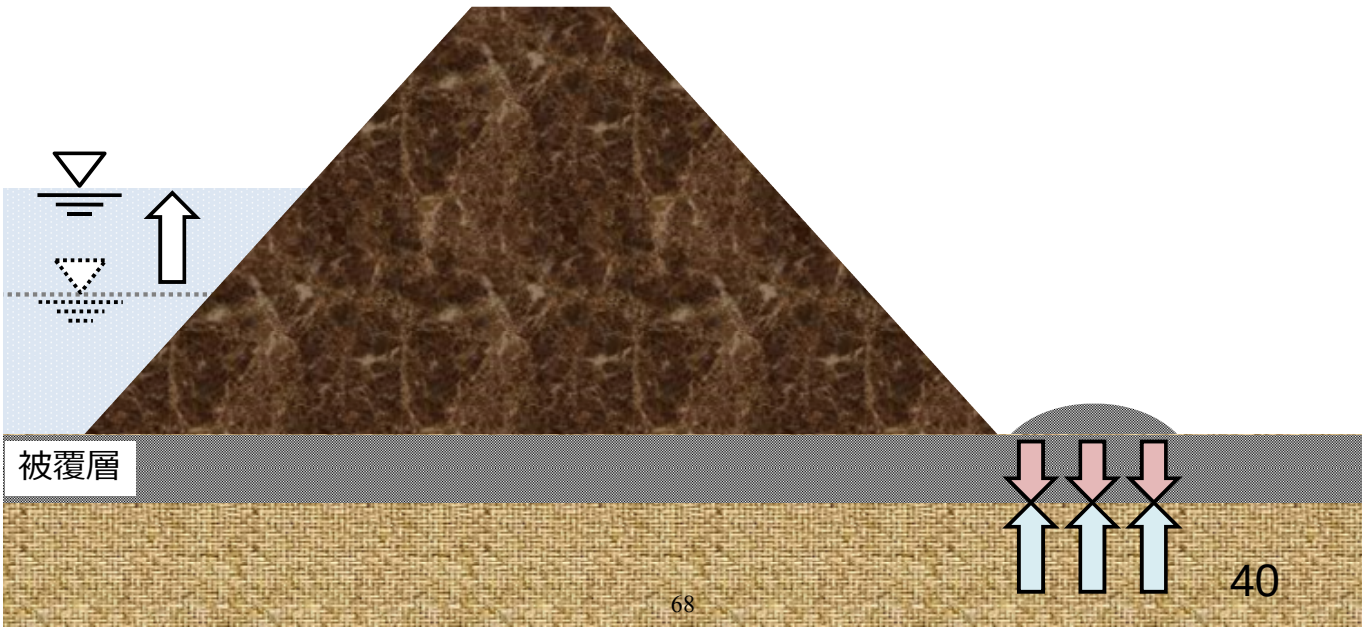
2b.基盤層の透水性が高い（被覆層有り）



38

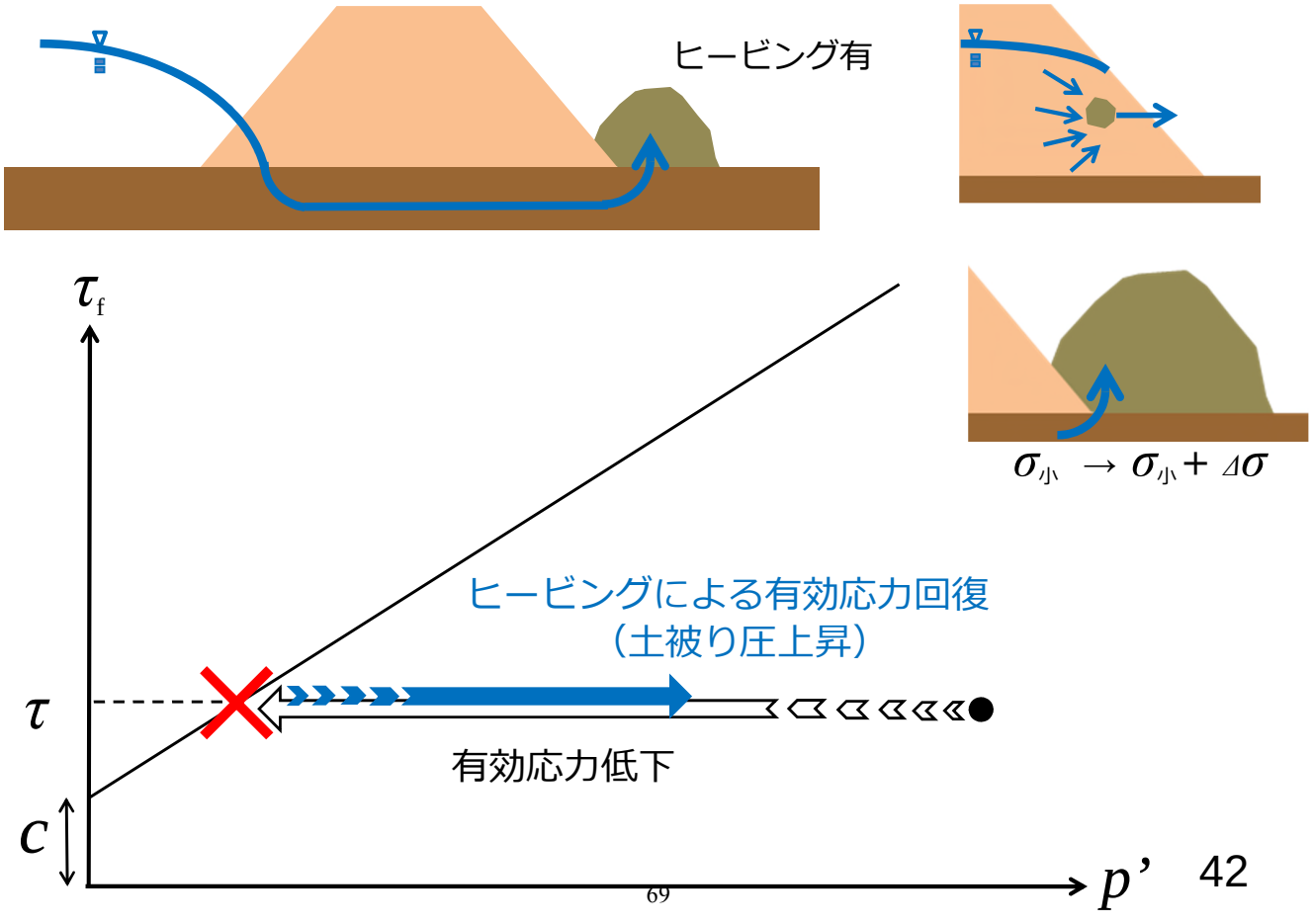
2b.基盤層の透水性が高い（被覆層有り）

2b.基盤層の透水性が高い（被覆層有り）



2b.基盤層の透水性が高い（被覆層有り）

2b.基盤層の透水性が高い（被覆層有り）

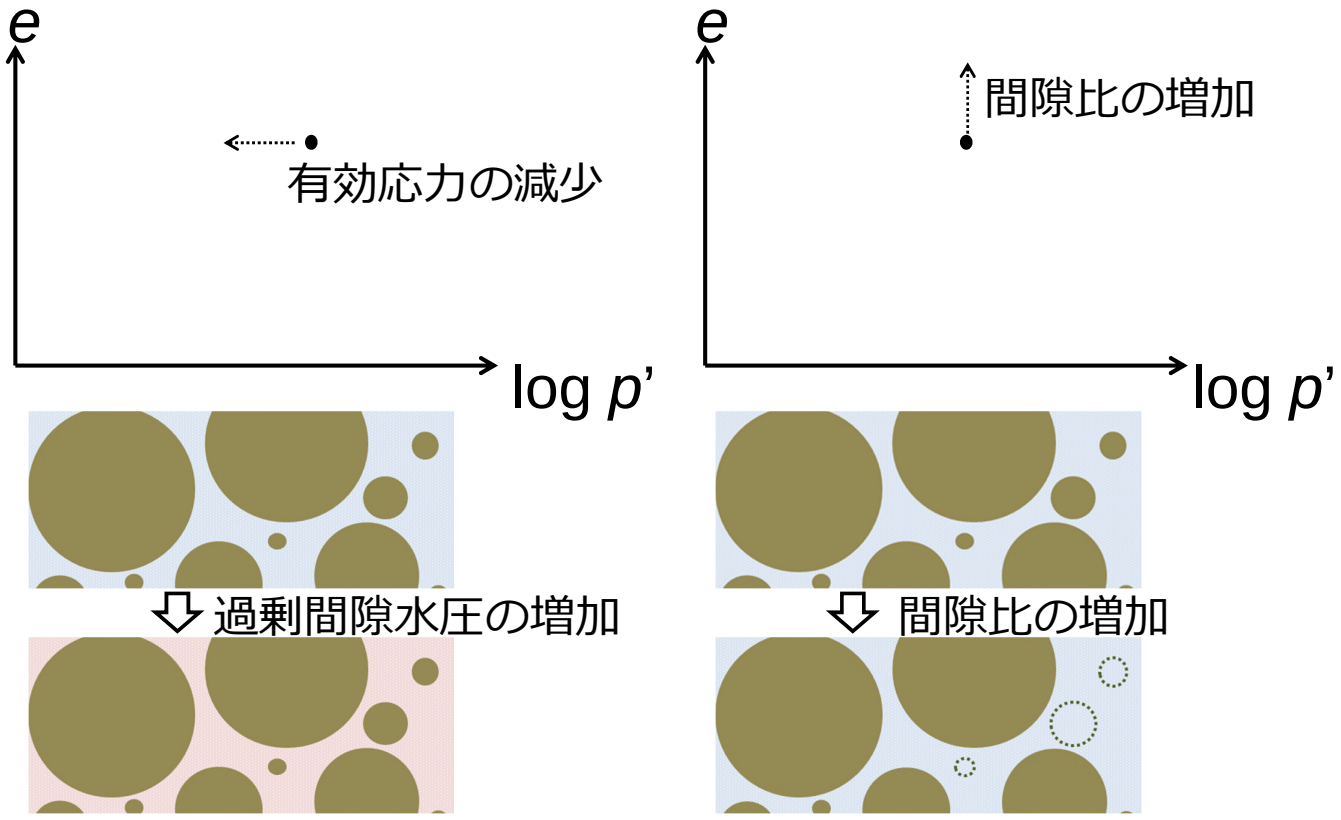


その他

言葉の定義など

43

“液状化”“ゆるみ”



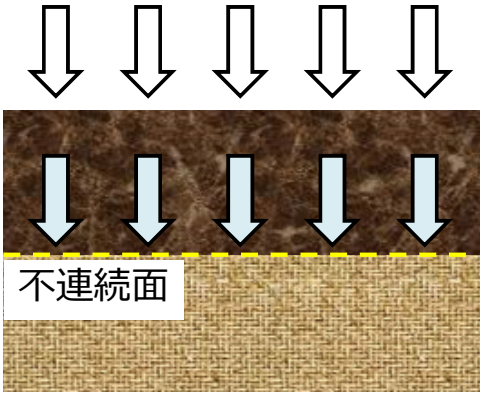
44

“浸潤”と“浸透”の違いは？

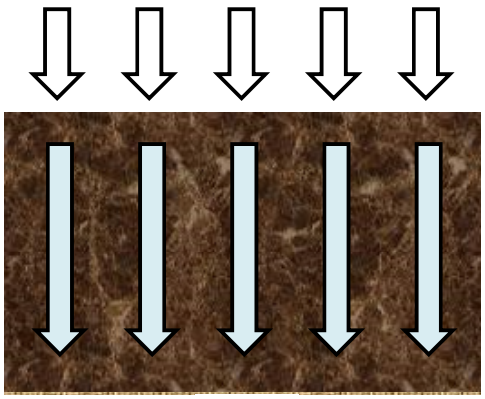
浸潤
土壌中へ水が不連続面（浸潤前線）をもって侵入してゆく移動形態である．

浸透
不連続面が地下水面または湿潤部分に到達し消滅したあとの移動形態である．

参考：長谷川周一，前田隆，佐々木清一：
土の水平浸潤および不飽和透水係数に関する研究，1977（北海道大学農学部）



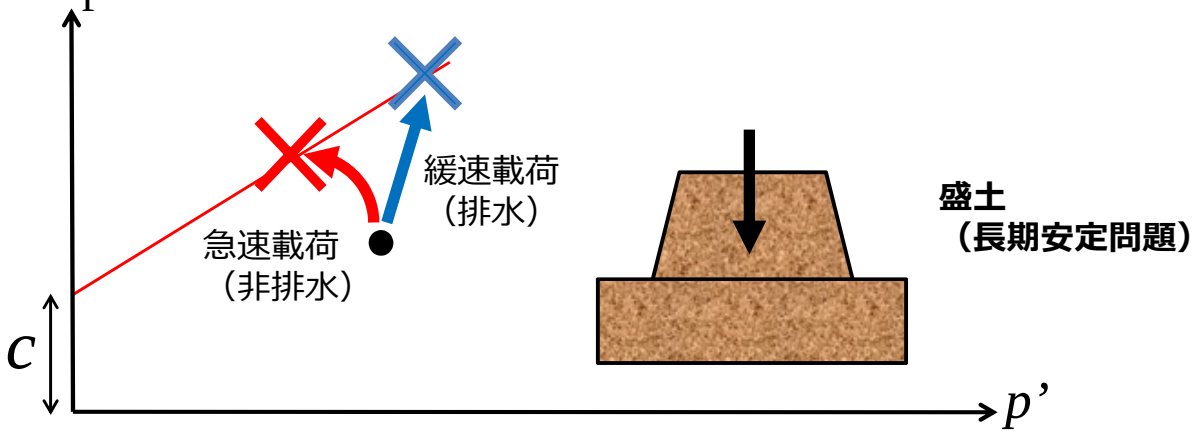
浸潤



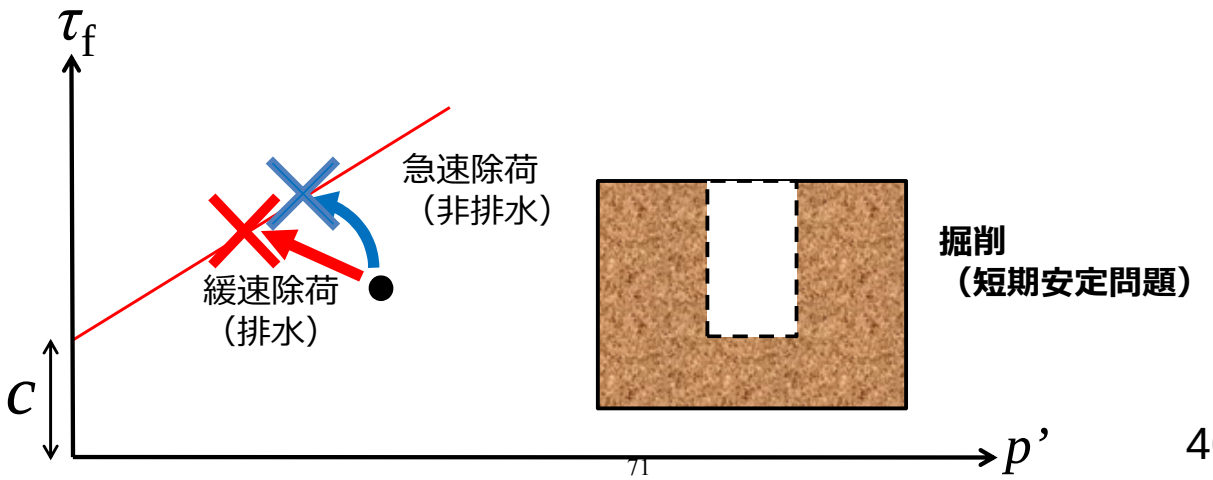
浸透

45

τ_f 地盤における”一般的な破壊”



盛土
（長期安定問題）



掘削
（短期安定問題）

46

地盤力学の知見の整理

- せん断強度と有効応力
- 液状化
- 内部侵食
- ……

47

今後の作業

- Ver.1をめざして.
- 地盤分野と河川分野のディスカション
- 複数の限界基準の連動・融合：限界動水勾配，すべりの安全率，限界状態，限界流速….
- 事例分析
- 現行の浸透破壊基準について
- 効果的な浸透破壊対策方法について

48

地盤工学委員会堤防小委員会「浸食・浸透破壊・洗掘 WG」＋水工学委員会河川部会「堤防 WG」

第 5 回合同会議　議事録（案）

日　時　：　2014 年 3 月 11 日（火）15:00～17:30
場　所　：　（社）土木学会 A 会議室
出席者　：　[浸食・浸透破壊・洗掘 WG]
前田，佐々木，坂本，小高，高橋，丹下，藤本，與田，森
[堤防 WG]
服部，溝口，三戸，阿部
［オブザーバー］
泉，岡本　（敬称略）

■議題

１．前回議事録確認
２．浸透破壊のより深い理解に向けて（2 回目：河川分野からの話題提供）
３．議論（今年度のとりまとめ方など）
４．今後の予定

■配布資料

・前回議事録
・浸透破壊紙芝居作成プロジェクト Ver.0
・進行性浸透破壊に関する一考察：水理学的不安定性の視点から（北海道大学　泉典洋）
・浸透破壊紙芝居作成プロジェクト Ver.1 (国総研　服部敦)
・河川堤防の被災プロセスマップ　（国総研　森啓年）
・堤防の法面すべり現象に関する疑問（名城大学　溝口敦子）

■議事内容

１．浸透破壊紙芝居作成プロジェクト Ver.0 について（前田）

・浸透による有効応力の減少（過剰間隙水圧の増加）に伴う液状化のような状態への遷移やせん断抵抗の低下によって、土要素の不安定化やすべり破壊が生じることに視点をおいて説明した。

２．進行性浸透破壊に関する一考察（泉）

・浸透破壊は一様に進行しない。どこかに集中するとますます集中する。この現象について、浸透破壊プロセスを水理学的安定性の視点から定式化と考察を試みた。
・浸透破壊は無限に小さいスケールで生じるが、地盤表層の破壊は大きいスケールで発生しようとする。浸透が小さいスケールで集中しようとする性質と、地盤が大きいスケールで破壊しようとする性質のせめぎあいで適当なスケールの破壊が生じるのではないか。
・すべるときの幅と奥行きには一定の関係があると考えられる。

３．堤防の法面すべり現象に関する疑問（溝口）

・堤防模型に対する浸透実験で確認された法面の破壊現象は、表層の砂粒が水流と土砂の流れに

より運ばれる現象であり、すべり破壊とは異なるのではないか？
・破壊が進行するとすべり破壊に近い現象もみられるが、最初の切欠はすべり破壊ではないのではないか？
・これに対して、間隙水圧の上昇とともに土の強度が低下することによってすべりが発生するような模型実験の現象では，基礎地盤に浸透した水の行き場がなくなって水圧が上昇したためではないか、との意見があった。

４．浸透破壊紙芝居 ver.1（服部）
・「間隙水圧の上昇分だけ有効応力が減少」という見方は、静水・定常浸透では結果的によいが、水圧・浮力による上載荷重の低減と浸透流による抵抗に分けて考える水理的な見方を活用すると、水平方向のパイピングのようなより複雑な現象の理解が進むと考えられる。
・その見方を活用して、小スケール（粒子レベル)、中スケール（土要素レベル)、大スケール（土層レベル）で見たときの有効応力と水圧・抵抗の関係と、それにもとづくパイピングのプロセスやメカニズムについて考え方を整理した。
・外力を大きくしていくと、まずどのスケールの破壊が生じるのか？　それを分ける土質条件は何か？　どのスケールの破壊が矢部川のようなカタストロフィックな進行性破壊となるのか？といった点を今後検討していく必要がある。

５．河川堤防の被災プロセスマップ（森）
・堤防決壊に至る過程での土と水の挙動を、被災プロセスマップとして整理してみてはどうか。
・すでに作成されている紙芝居等を参考にしながら、作用する力や発生する現象をマップ上に書き込んでいくイメージとなる。

６．今後の取り組みと予定
・進行性破壊に重点を置いて整理してみる。
・被災プロセスマップを作ってみる。その際、すべりとパイピングのメカニズムの整理も必要。当面の担当は以下のとおりとする。
　　小高，杉井，溝口，前田，服部，森

・現場でみられる現象から何が起こっているかがわかるようにまとめることも必要。
・次回の日程は４月に入ってから調整する。

以上

第5回合同会議資料

進行性浸透破壊に関する一考察：水理学的不安定性の観点から

2014年3月11日

北海道大学　泉　典洋

吾妻川沿いの
渓岸侵食

浸透流による
侵食によって
発達した水路

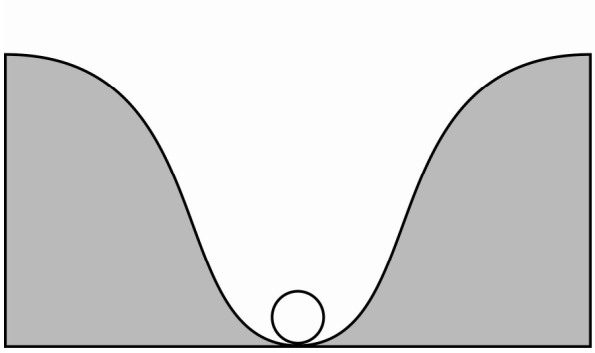
実験

3

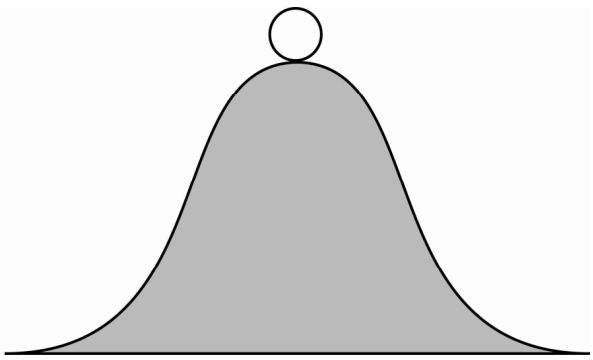
安定と不安定

- どちらも平衡状態だが. . . . .

安定な平衡状態

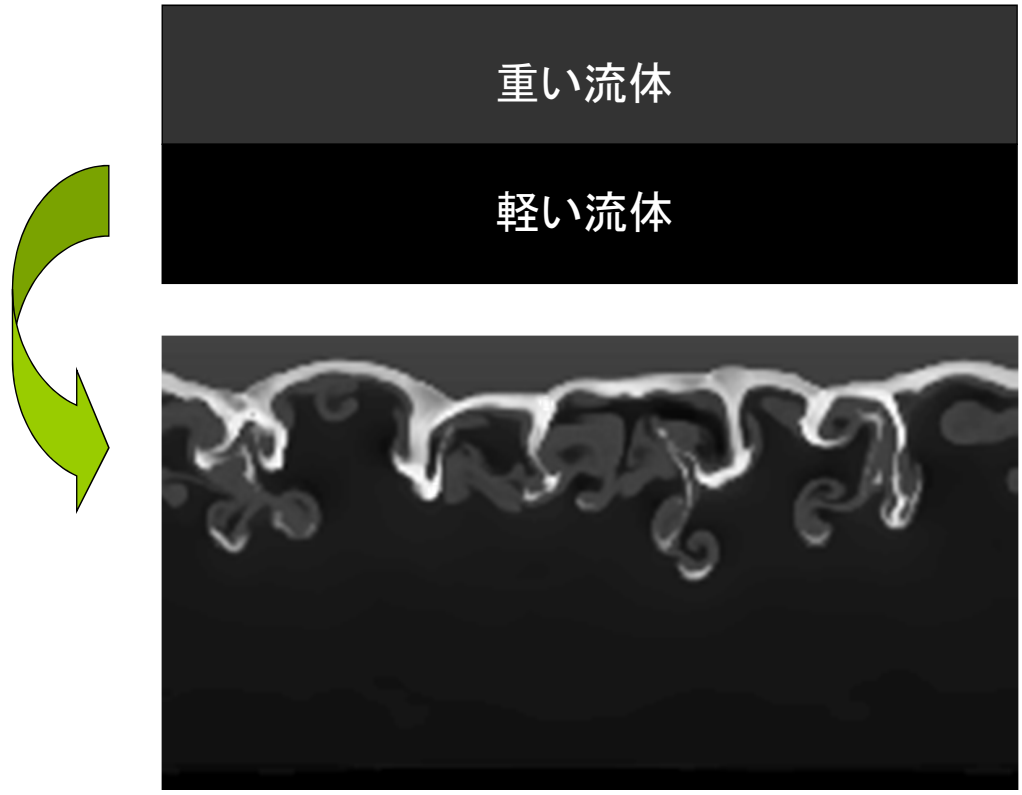


不安定な平衡状態



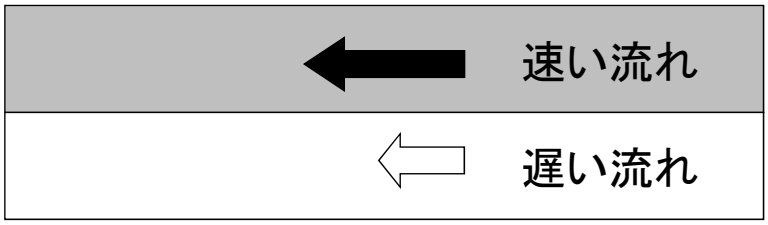
4

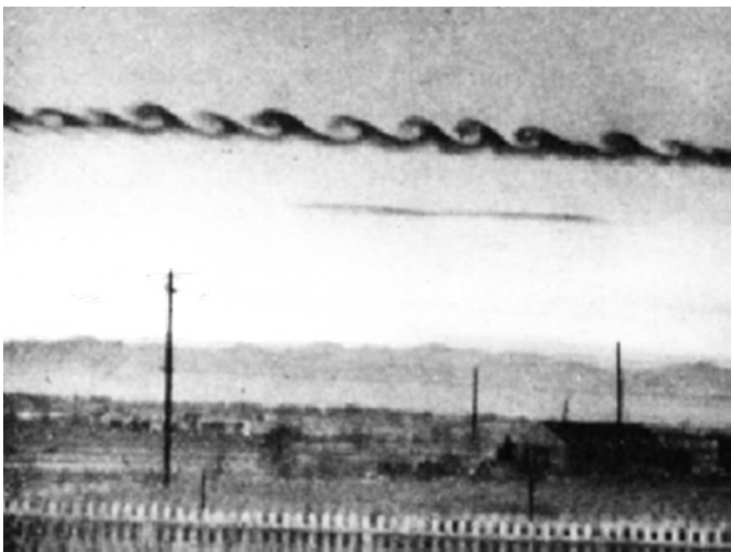
Rayleigh-Taylor不安定



5

Kelvin-Helmholtz不安定





6

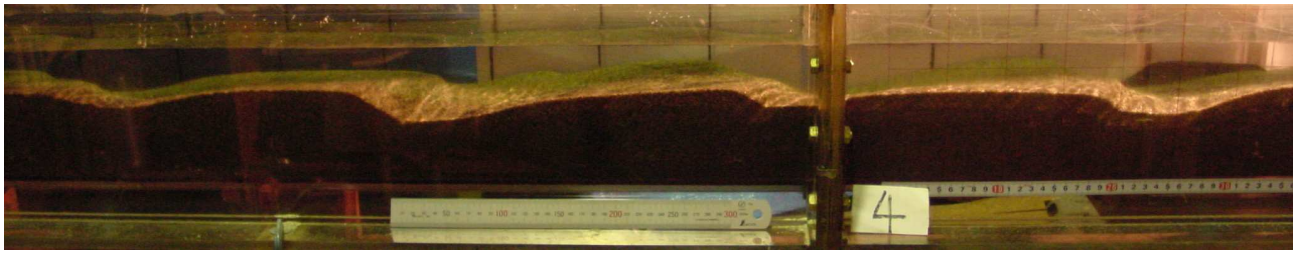
Benard-Raileigh不安定

7

界面不安定

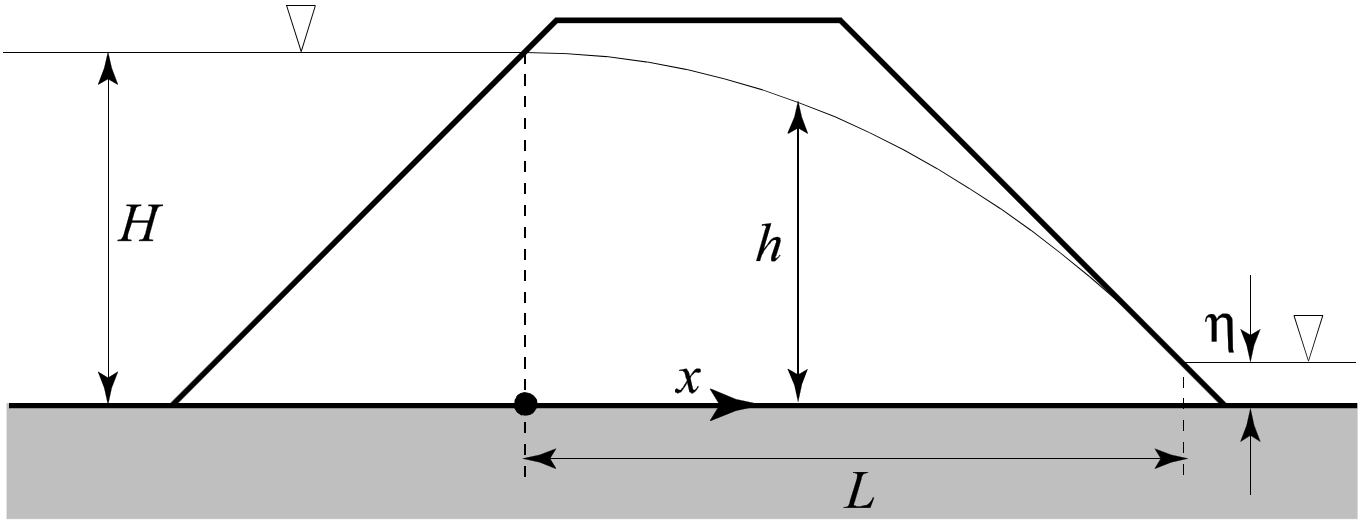
気液界面不安定

固液界面不安定



8

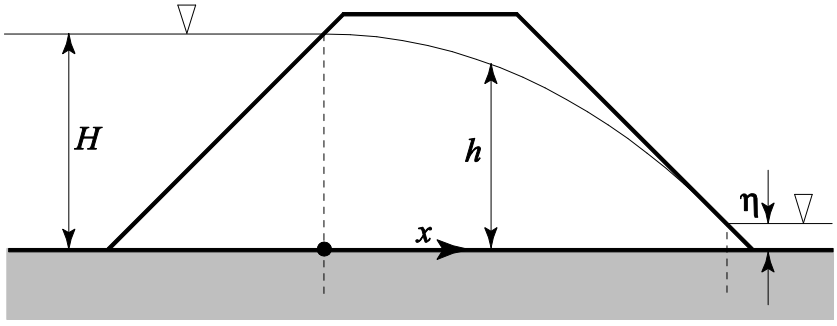
堤防内浸透流の概念図

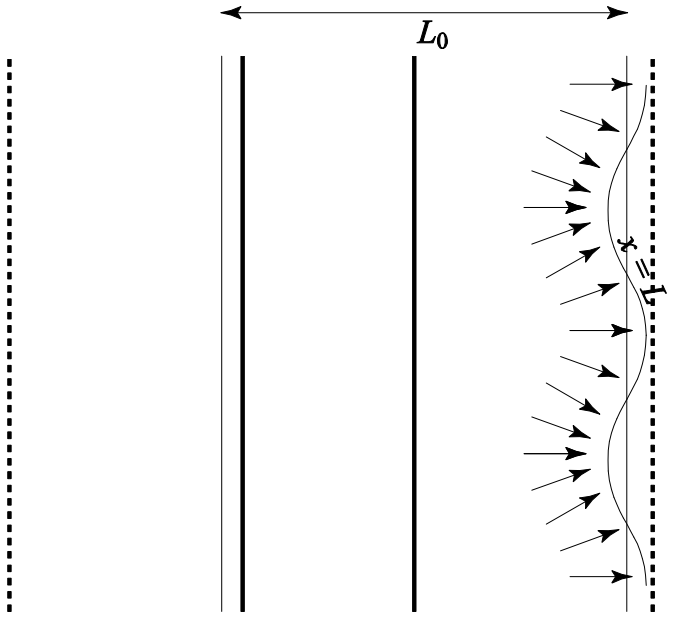


9

進行性浸透破壊の発生

断面図





平面図

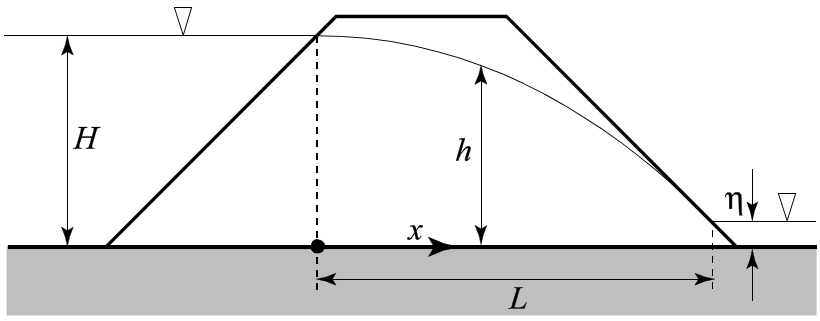
10

浸透流の定式化

- 連続の式 $$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial uh}{\partial x}+\frac{\partial vh}{\partial y}=0$$
- Darcy's law $$(u,v)=-K\left(\frac{\partial h}{\partial x},\frac{\partial h}{\partial y}\right)$$
- Darcy-Forchheimer eqn.

$$\frac{\partial h}{\partial t}-K\left[\frac{\partial}{\partial x}\left(h\frac{\partial h}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(h\frac{\partial h}{\partial y}\right)\right]=0$$

境界条件



$$h=H \quad \text{when} \quad x=0$$

$$h=\eta \quad \text{when} \quad x=L$$

浸透破壊プロセスの定式化

- 堤防脚部($x = L$)における単位幅流量に比例して浸透破壊が生じると仮定

破壊の時間進展 $$\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t} = -\alpha q(L)$$

単位幅流量 $$q(L) = \sqrt{u^2(L) + v^2(L)} \cdot h(L)$$

$$u(L) = -Kh\frac{\partial h}{\partial x}\bigg|_{x=L} \qquad v(L) = -Kh\frac{\partial h}{\partial y}\bigg|_{x=L}$$

13

一次元問題

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}x}\left(h\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}x}\right) = 0 \quad \Rightarrow \quad h\frac{\mathrm{d}h}{\mathrm{d}x} = \frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}h^2}{\mathrm{d}x} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}^2h^2}{\mathrm{d}x^2} = 0$$

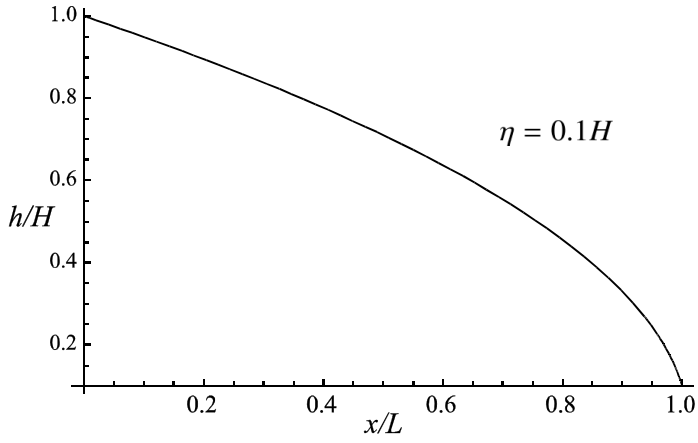
一般解 $$h^2 = C_0 x + C_1$$

境界条件

$$h = H \quad \text{when} \quad x = 0$$
$$h = \eta \quad \text{when} \quad x = L$$

解

$$h^2 = H^2 - \frac{H^2 - \eta^2}{L}x$$



水位

14

無次元化

$$h = Hh^*, \quad (x, y) = L_0 (x^*, y^*), \quad t = \frac{L_0}{\alpha q_0(L_0)} t^*$$

$$\beta \frac{\partial h^*}{\partial t^*} - \frac{1}{2}\left[\frac{\partial^2 h^{*2}}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial^2 h^{*2}}{\partial y^{*2}}\right] = 0$$

$$\beta = \frac{\alpha q_0(L_0)}{KH/L_0} << 0$$

$$h^* = 1 \quad \text{when} \quad x^* = 0$$

$$h^* = \eta^* \quad \text{when} \quad x^* = L^*$$

$$\frac{\mathrm{d}L^*}{\mathrm{d}t^*} = -\sqrt{\left(h^* \frac{\partial h^*}{\partial x^*}\bigg|_{x^*=L^*}\right)^2 + \left(h^* \frac{\partial h^*}{\partial y^*}\bigg|_{x^*=L^*}\right)^2}$$

以降，表記を簡単にするため＊を落とす

15

準定常の仮定

- 浸透流の変化に比較して浸透破壊の進行は十分遅いと仮定し，βの付いた項を無視

$$\frac{\partial^2 G}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} = 0 \qquad G = h^2$$

$$G = 1 \quad \text{when} \quad x = 0$$
$$G = \gamma \quad \text{when} \quad x = L \qquad \gamma = \eta^2$$

$$\frac{\mathrm{d}L}{\mathrm{d}t} = -\left[\frac{1}{2}\sqrt{\left(\frac{\partial G}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G}{\partial y}\right)^2}\right]_{x=L}$$

16

摂動展開

$$G(x,y,t) = G_0(x) + AG_1(x)\exp \mathrm{i}(ky - \omega t)$$

$$L(y,t) = L_0 + AL_1 \exp \mathrm{i}(ky - \omega t)$$

A ： 擾乱の振幅（微小と仮定）

k ： 擾乱の波数 (= 2π/波長)

ω ： 擾乱の複素角周波数

$$\omega = \omega_r + \mathrm{i}\omega_i$$

$$\exp \mathrm{i}(ky - \omega t) = \exp \omega_i t \exp \mathrm{i}(ky - \omega_r t)$$

$\omega_i < 0$ 擾乱は減衰　　$\omega_i > 0$ 擾乱は成長

17

$O(1)$

流れの式 $$\frac{\mathrm{d}^2 G_0}{\mathrm{d}x^2} = 0$$

境界条件 $$G_0(0) = 1$$
$$G_0(L_0) = \gamma$$

流れの解 $$G_0 = 1 - \frac{1-\gamma}{L_0}x$$

浸透破壊 $$\frac{\mathrm{d}L_0}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{2}\frac{\mathrm{d}G_0}{\mathrm{d}x}\bigg|_{x=L_0} = -\frac{1-\gamma}{2L_0}$$

18

$O(A)$

流れの式 $$\frac{\mathrm{d}^2 G_1}{\mathrm{d}x^2} - k^2 G_1 = 0$$

境界条件 $$G_1(0) = 0 \qquad G_1(L_0) + \frac{\mathrm{d}G_0(L_0)}{\mathrm{d}x} L_1 = 0$$

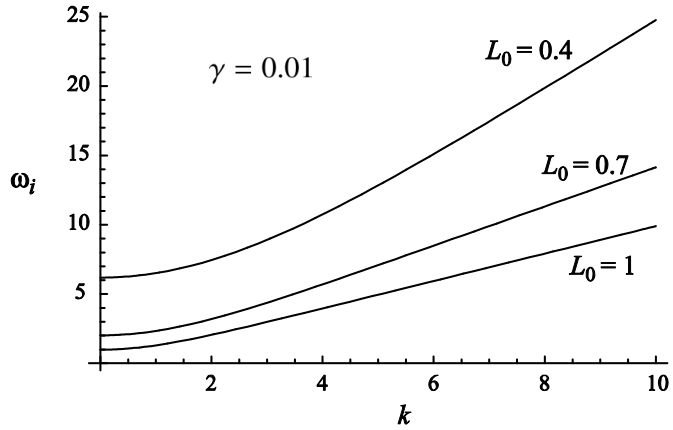
流れの解 $$G_1 = \frac{1-\gamma}{L_0} L_1 \frac{\sinh ky}{\sinh kL_0}$$

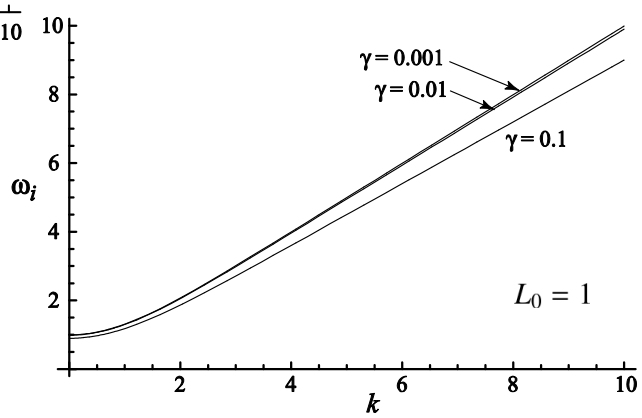
浸透破壊 $$-\mathrm{i}\omega L_1 = k \frac{1-\gamma}{2L_0} L_1 \frac{\cosh ky}{\sinh kL_0}$$

擾乱の成長率 $$\omega_i = k \frac{1-\gamma}{2L_0} \frac{\cosh kL_0}{\sinh kL_0}$$

19

成長率の波数依存性





20

浸透破壊のスケール

- 不安定性が最大となる卓越波数は無限大
- 不安定性の生じるスケールは無限小
- 浸透破壊は無限に小さいスケールで生じる
- しかし地盤表層の破壊は大きいスケールで発生しようとする？
- 浸透が小さいスケールで集中しようとする性質と，地盤表層が大きいスケールで破壊しようとする性質のせめぎあいで，適当なスケールの破壊が生じる？

21

浸透破壊紙芝居作成プロジェクト Ver.1

Ver.1：浸透破壊プロセスの理解に向けてのキックオフ，水理学的観点を主体として

※Ver.0「地盤工学的観点を主体として」と併せて参照のこと

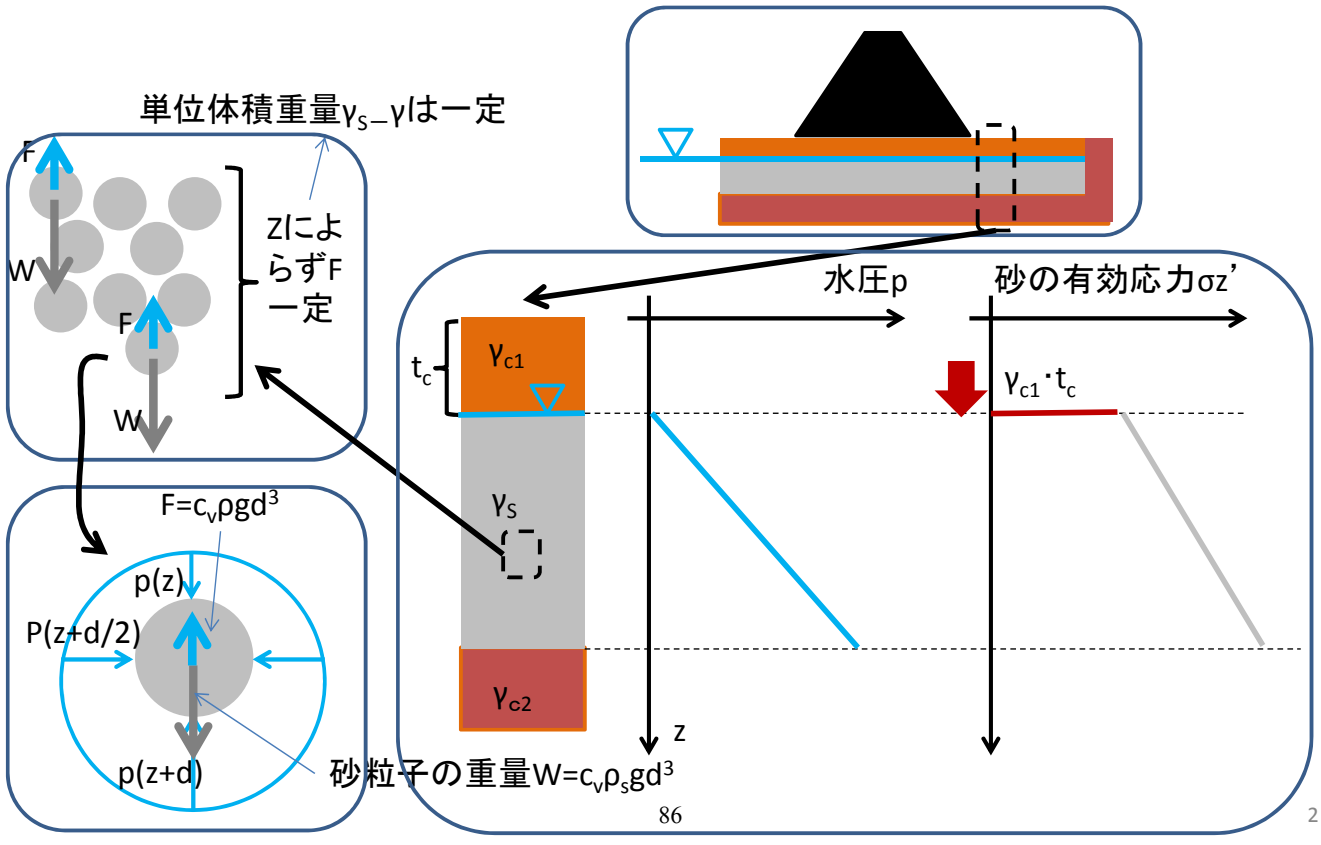
国総研　服部作成

堤防WG資料20140311

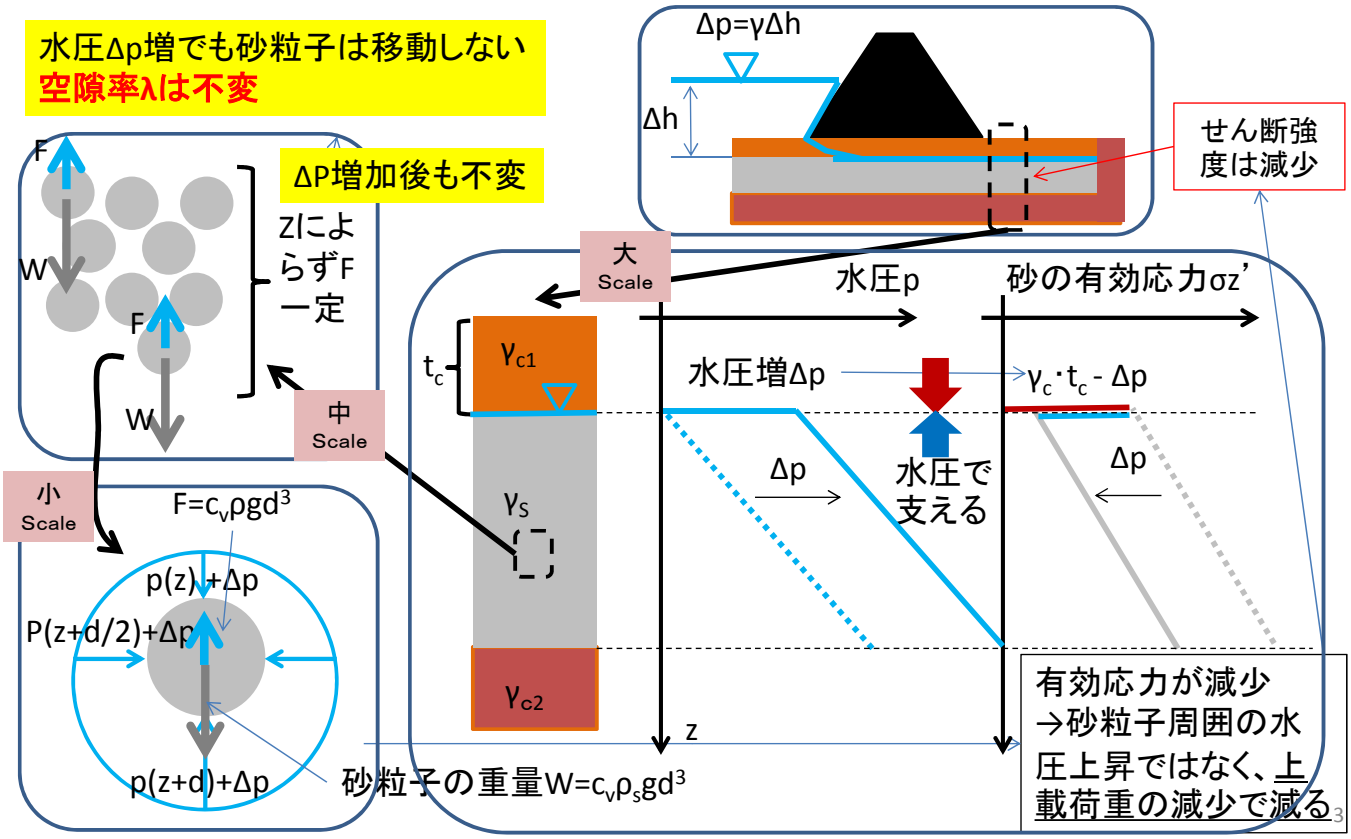
わかっていないこと、まちがっているかもしれないことを思い切って書いているので、WG議論で「要修正」

その程度のたたき台資料として扱ってください

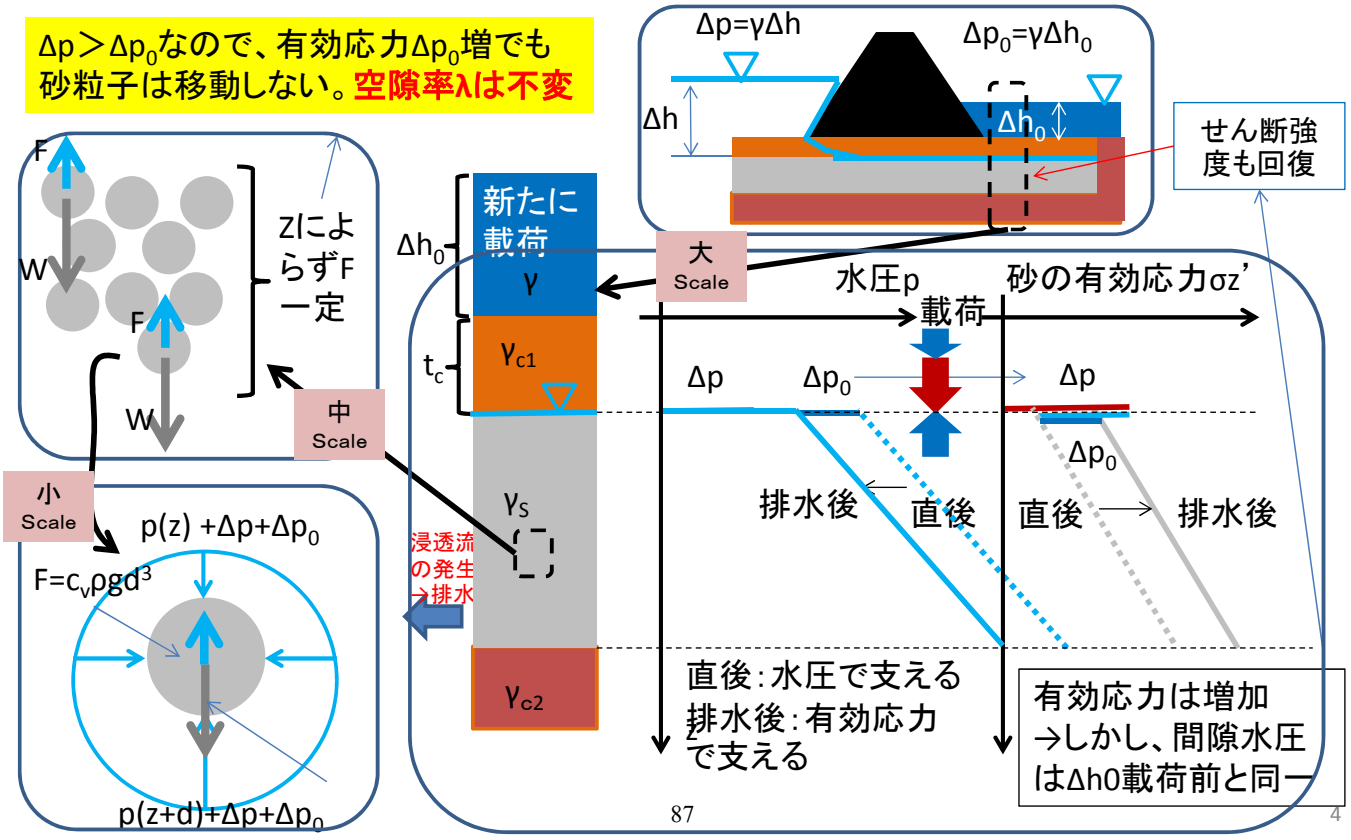
有効応力と水圧・抵抗の関係をもう一度、整理しよう（その1：初期状態）



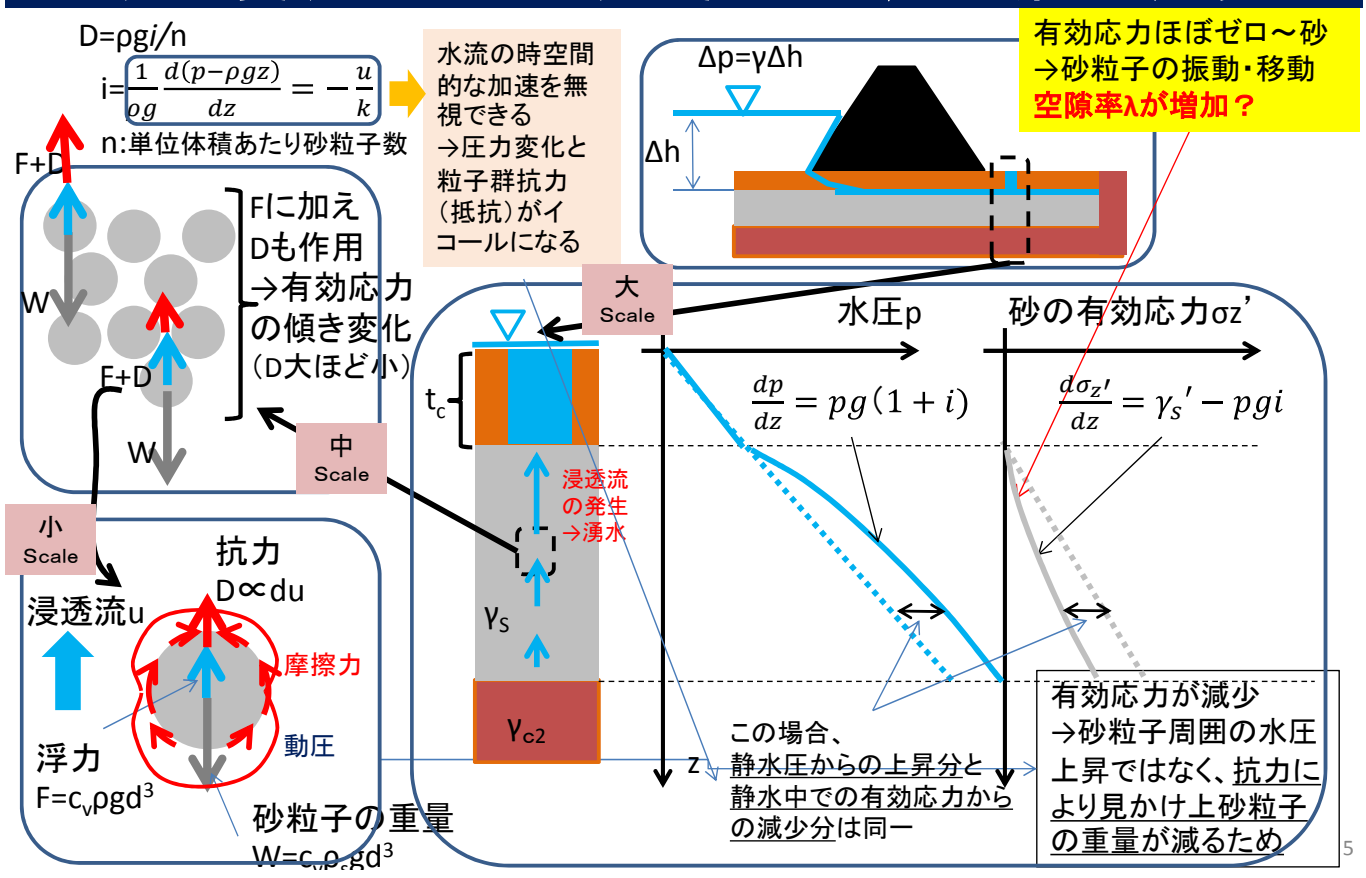
有効応力と水圧・抵抗の関係を もう一度、整理しよう（その2：水位上昇）



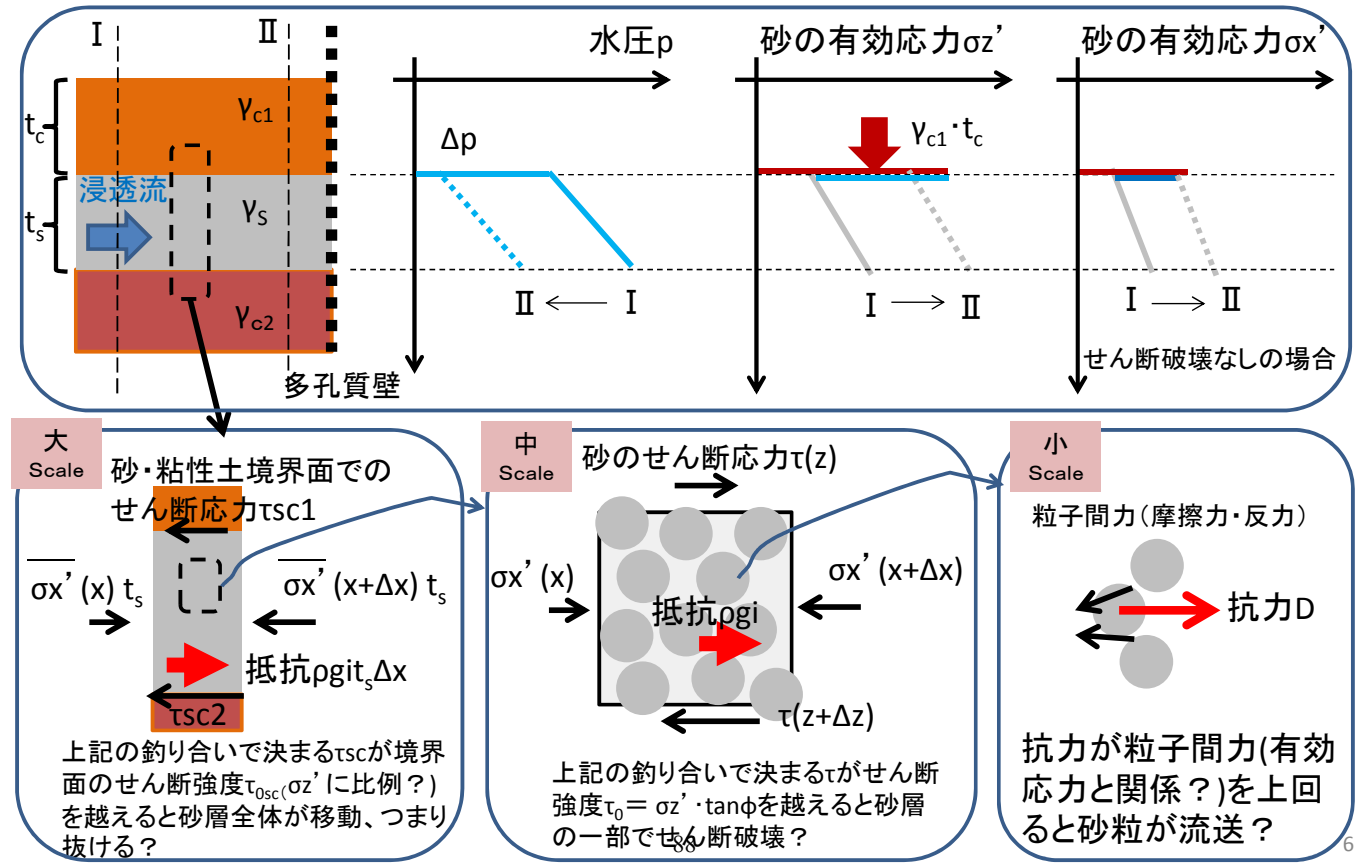
有効応力と水圧・抵抗の関係を もう一度、整理しよう（その3：内水氾濫）



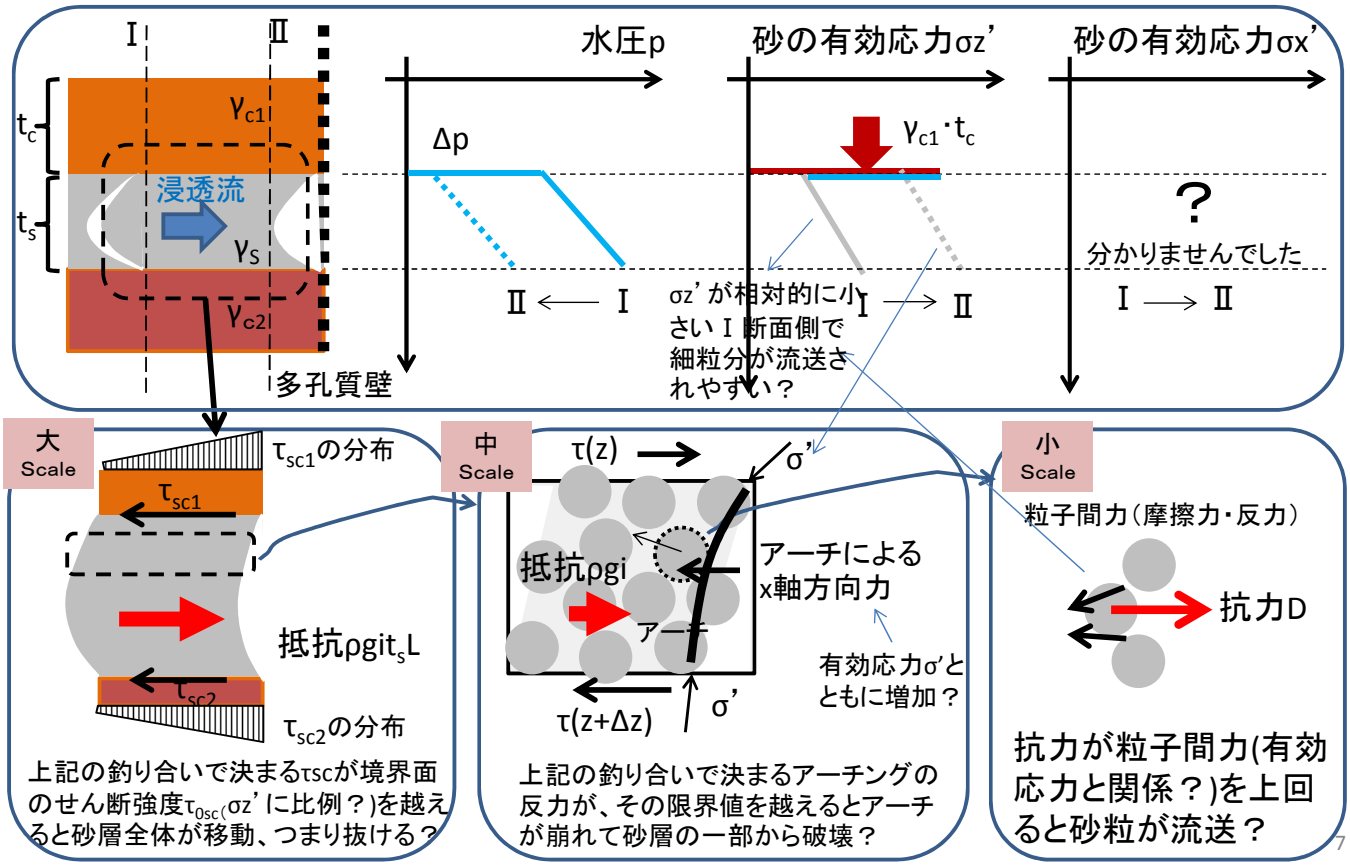
有効応力と水圧・抵抗の関係を もう一度、整理しよう（その4：表土層の喪失）



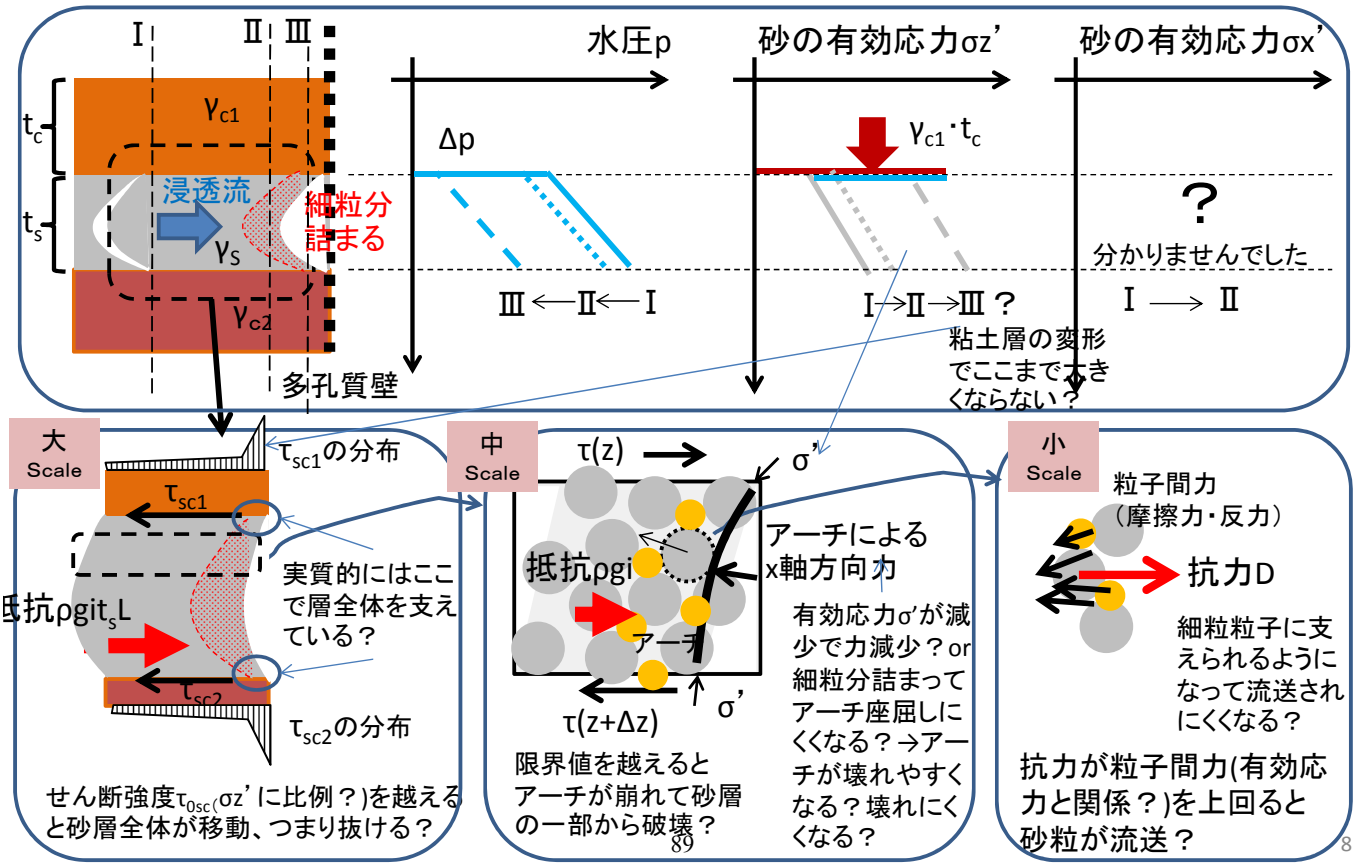
パイピングに応用しよう その1：初期状態



パイピングに応用しよう
その2：すき間ができた状態



パイピングに応用しよう
その3：さらに細粒分詰まりが生じた状態



まとめ

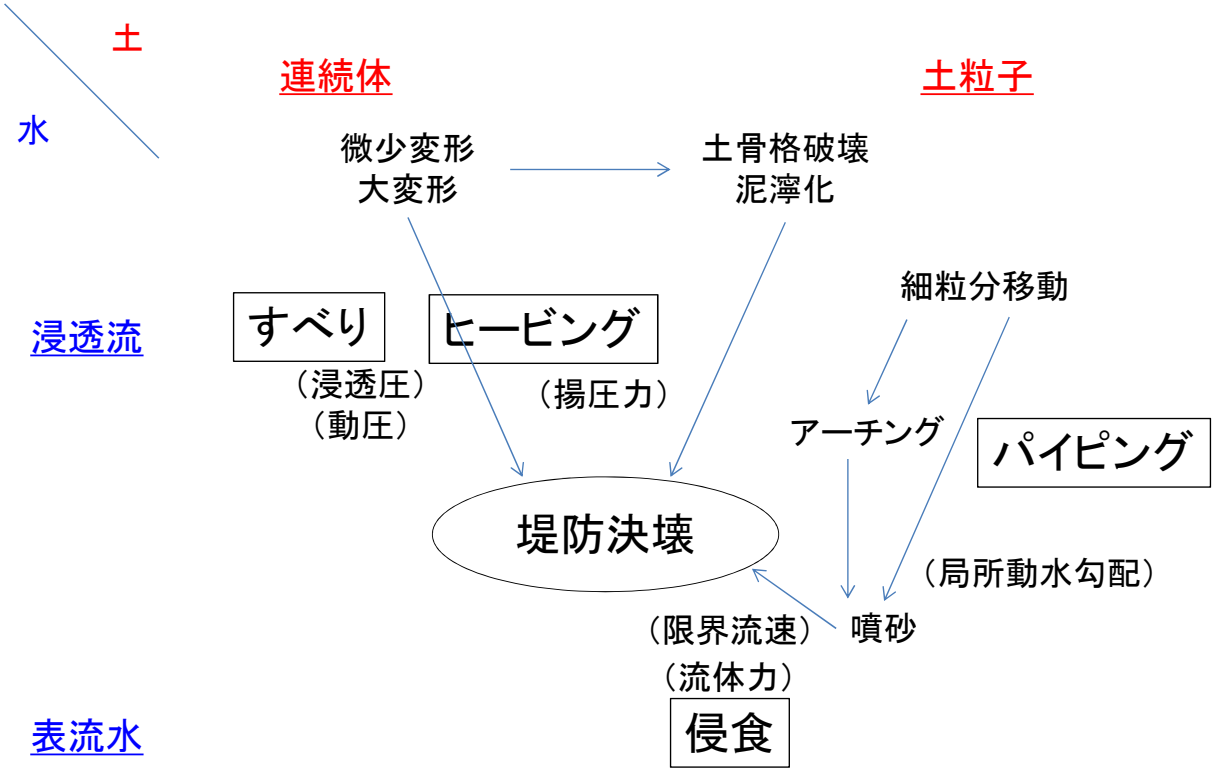
- 有効応力と水圧・抵抗の関係をもう一度、整理しよう
  - 結果としては「ΔPだけσ'減る」だが、その機構は大きく2つ（上載荷重と見かけ上の砂粒重量の変化）
- パイピングに応用しよう
  - あのような考え方でいいか？プロセスとメカニズム
  - 仮に良しとして、外力を大きくしていくと、まずどのスケールの破壊が生じるのか、それを分ける土質条件は？
  - どのスケールの破壊が矢部川のような「カタストロフィック」な急激な進行性破壊となるのか？ならないのか？複合的？それともスケール別で見るのが間違い？
  - 水屋と土屋の研究面・技術開発面・現場対応面での課題は？

9

河川堤防の被災プロセスマップ（スーパーたたき台）

土

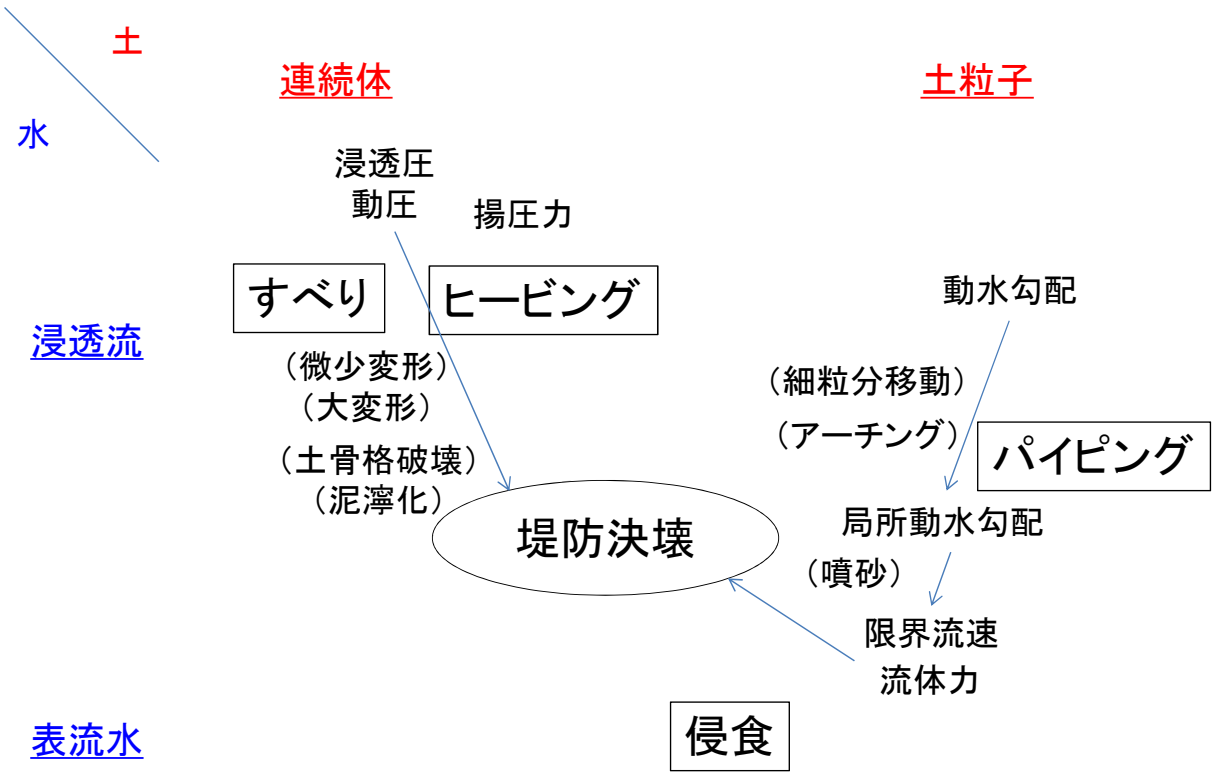
堤防決壊に至る過程での、土と水の挙動をみんなで書き込む



河川堤防の被災プロセスマップ（スーパーたたき台）

水

堤防決壊に至る過程での、水と土の挙動をみんなで書き込む



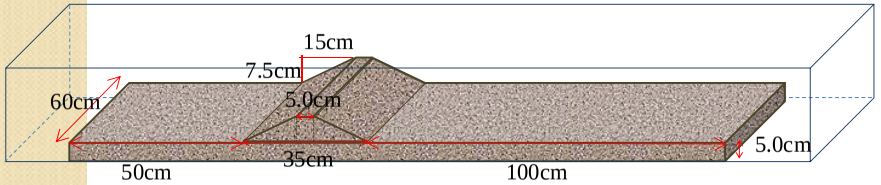
堤防の法面すべり現象に関する疑問
～土砂水理学的視点？から～

名城大学　溝口敦子

堤防法面破壊

- 水路横断堤防における破壊

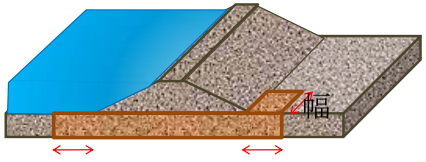
幅60cmの水路に横断堤防を設置して検討.
※硅砂5号（平均粒径0.55mm）を用いて密度1.5×10^3kg/m^3となるように堤防を作成.



堤水の仕方，満水状態での放置，堤防の欠損（穴をあける），基礎地盤の設定条件による堤防の変形を調べた結果，基礎地盤の設定条件により変形を促せることが分かった.

この実験条件では，堤外地側の水位上昇のみで浸透破壊が起こることはなかった．また，穴をあけるなどしても砂質堤防のためパイピングは起こらなかった.

透水性の高い礫層の設置条件

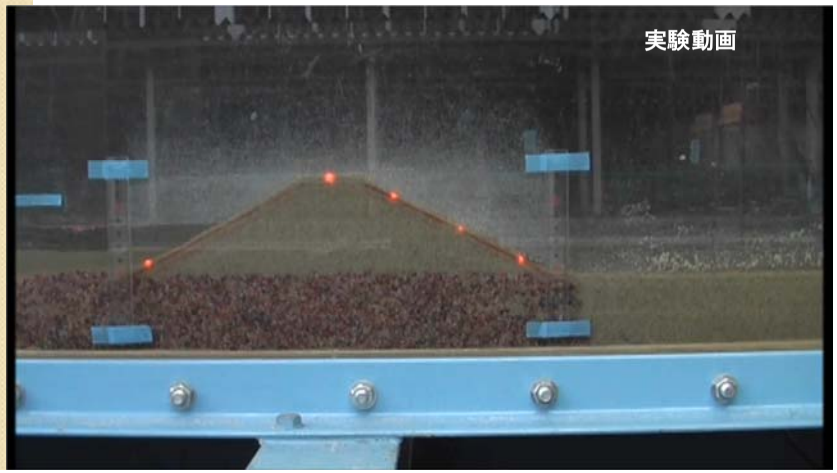


上流側　　下流側長さ
（表･裏法尻からの設置長さ）

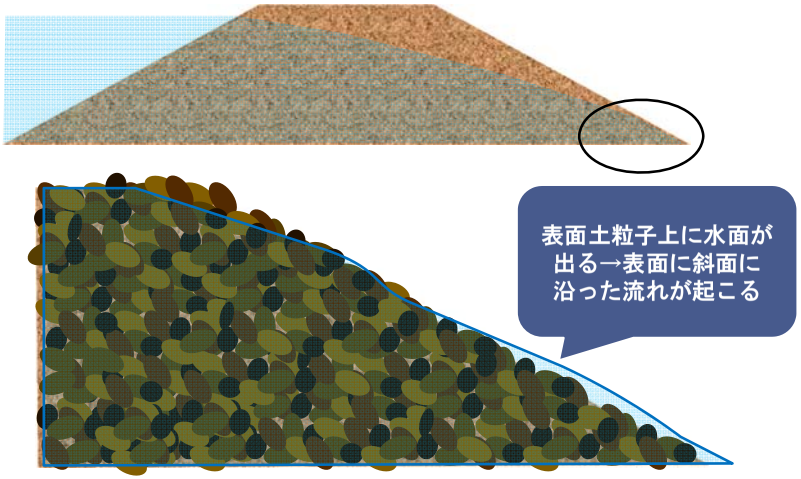
	幅	上流側長さ	下流側長さ
Case0	5	10	10
Case1	5	10	0
Case2	10	10	0

堤防の下で水位が高くなるような条件　⇒　法面が流動化

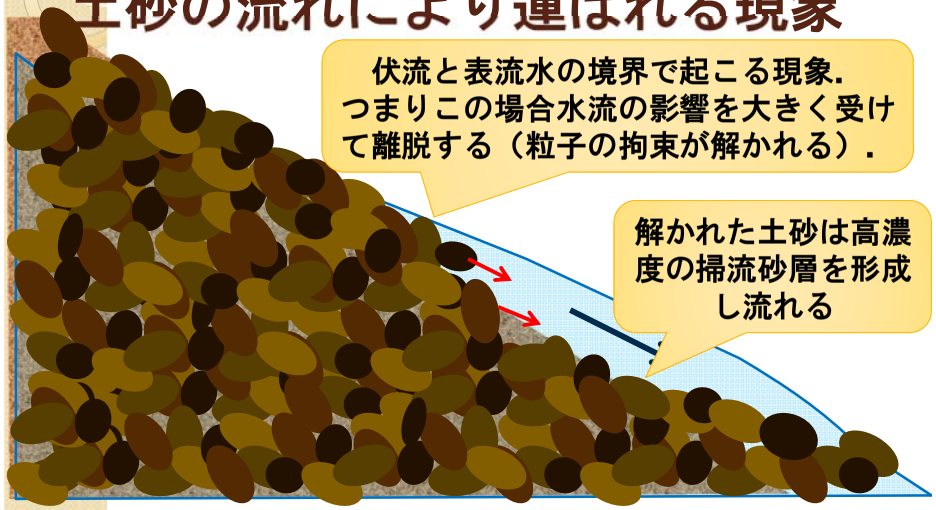
融けるような法崩れ
…つまり　表層の移動床現象
（多分現在起こりうる条件でつくられない？）



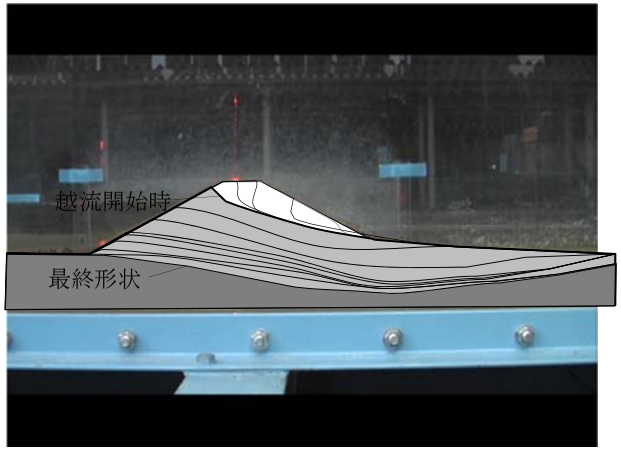
前回投げかけた疑問
法面表層の流動による破壊と円弧すべり破壊は異なるのでは？



土石流ならぬ掃流砂層ができた流れ
→つまり土塊でなく砂粒が水流と土砂の流れにより運ばれる現象

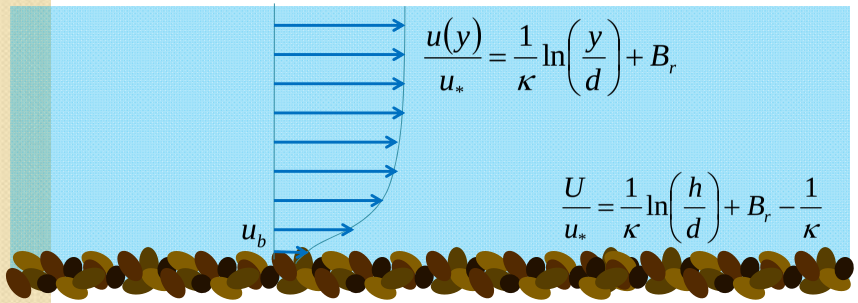


断面の時間変化



土粒子の流れ

- 水流の中で土砂が流れるということ
  最近では各粒子にかかる力を一つ一つ解くような研究もされているが，基本的には，水流が及ぼす力，重力，土粒子同士の摩擦力，揚力を考え，抜け出すのに必要な力等を総合させて掃流力で考える．



$$W = \sigma g d^3$$

$$B = \rho A_3 g d^3$$

$$D = \frac{\varepsilon}{2} C_D \rho u_b{}^2 A_2 d^2$$

$$L = k_L D$$

$$F = (W\cos\theta - B - L)\mu_f$$

σ ：砂の密度

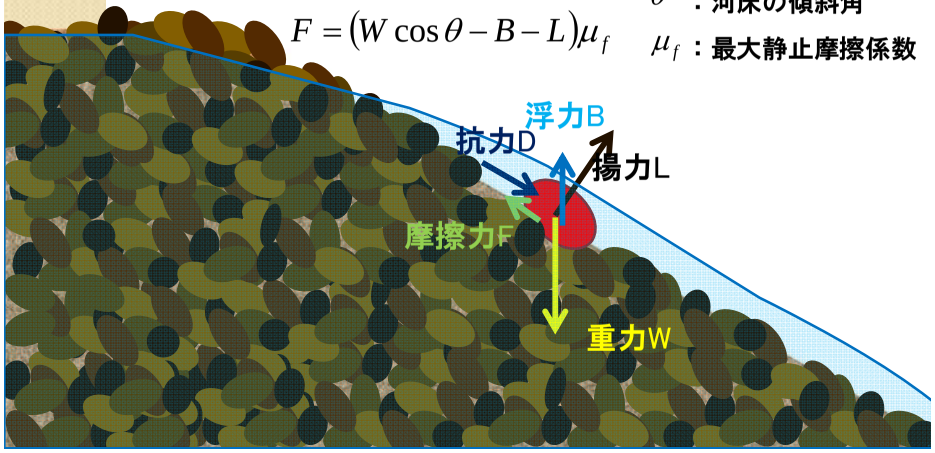
ε ：遮蔽係数

A_2, A_3 ：形状係数

k_L ：揚力抗力比

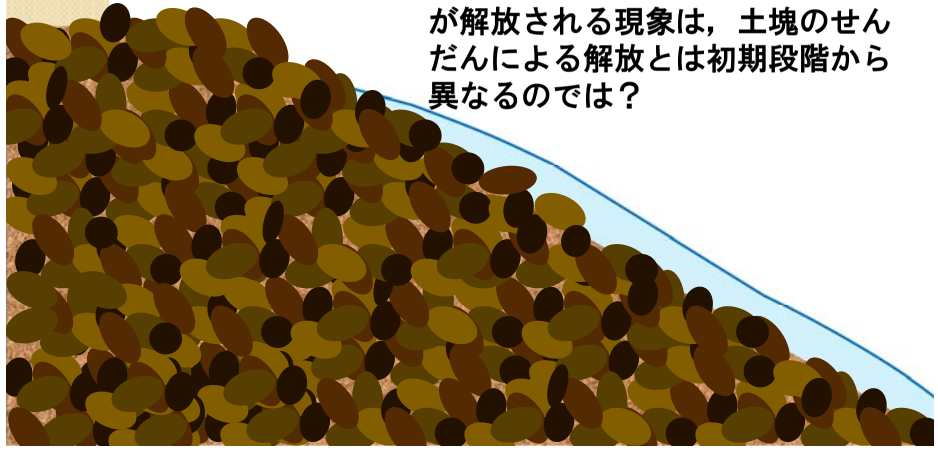
θ ：河床の傾斜角

μ_f ：最大静止摩擦係数



通常の掃流力で評価できる現象というより高濃度掃流砂層の形成，つまり掃流状集合流動？

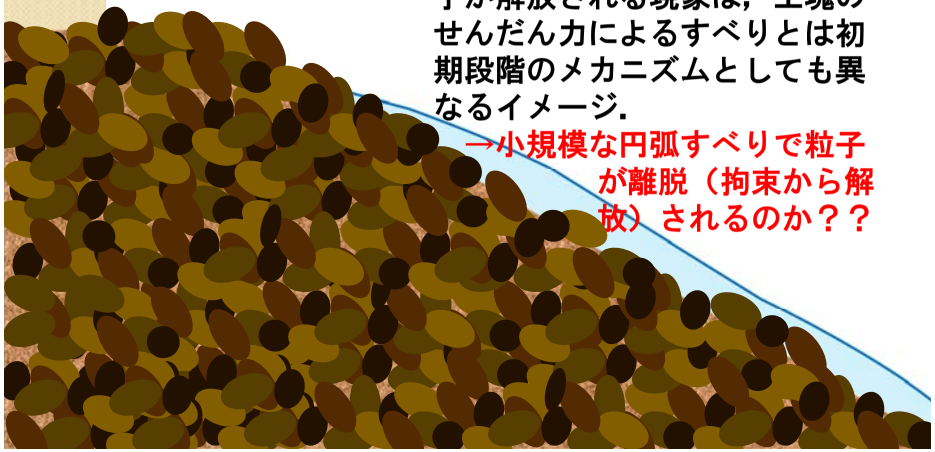
こうした水等の流れによる土粒子が解放される現象は，土塊のせんだんによる解放とは初期段階から異なるのでは？



高濃度掃流砂層の形成，つまり掃流状集合流動？

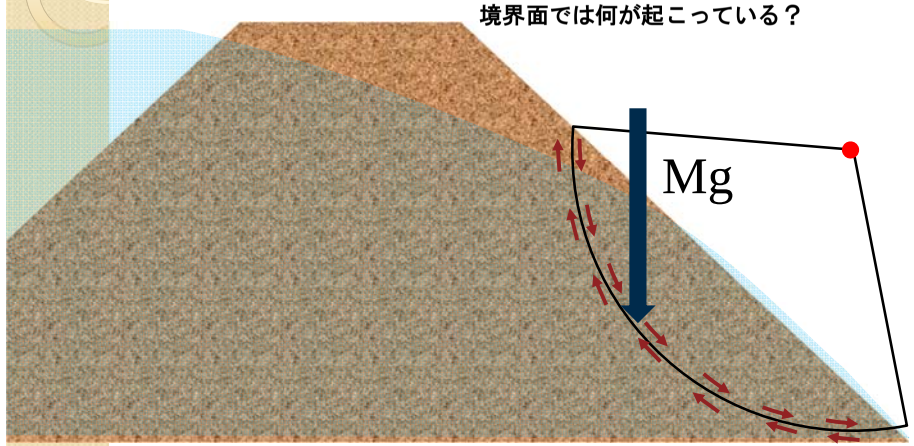
こうした水等の流れによる土粒子が解放される現象は，土塊のせんだん力によるすべりとは初期段階のメカニズムとしても異なるイメージ．

→小規模な円弧すべりで粒子が離脱（拘束から解放）されるのか？？

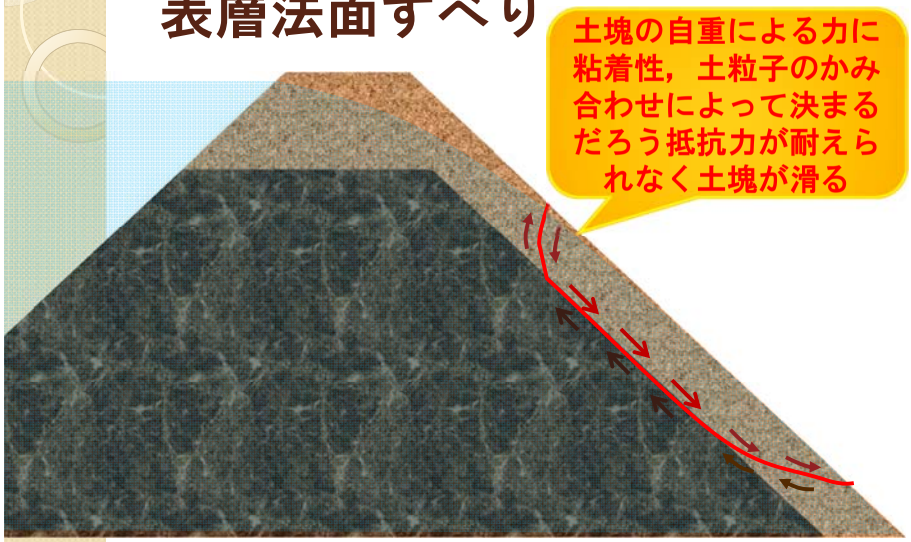


法面の円弧すべり

円弧すべりを起こすときの水分状態は？
境界面では何が起こっている？



表層法面すべり



法面すべり

東海豪雨時の被災状況

愛知県河川整備計画流域委員会：第40回愛知県河川整備計画流域委員会資料「庄内川上流圏域」，平成24年2月2日

地盤工学委員会堤防小委員会「浸食・浸透破壊・洗掘 WG」＋水工学委員会河川部会「堤防 WG」

平成 26 年度第 1 回（第 6 回）合同会議　議事録（案）

日　時　：　2014 年 10 月 3 日（金）15:00～17:30
場　所　：　（社）土木学会 F 会議室
出席者　：　[浸食・浸透破壊・洗掘 WG]
前田，石原，小高，高橋，杉井，石田，丹下，藤本，與田，森，李
[堤防 WG]
服部，溝口，松本，阿部
［オブザーバー］
岡本　（敬称略）

■議題

1．これまでの活動内容について
2．平成 26 年度の WG の活動予定について
3．今後の予定について

■配布資料

①平成 25 年度・平成 26 年度 WG の活動記録
②研究開発ロードマップの例

■議事内容

1．これまでの活動内容について

・前田リーダーより、平成 25 年度から平成 26 年度半期の WG の活動内容について、資料に基づいて報告があった。

2．平成 26 年度のWGの活動予定について

■平成 26 年度のWGの活動予定（案）

・前田リーダーより、平成 26 年度の WG の活動予定について、以下のとおり提案があった。
  - 予測・評価の総合的類型化マップを作成する。
  - 浸透破壊事例について定量的な分析を行う。
  - 堤防技術の研究開発ロードマップを作成する。
・森委員より、国交省の研究開発ロードマップについて説明があった。
・石原委員代理より、地盤工学会で作成しているロードマップについて説明があった。

■現状の課題認識について

・浸透破壊については進行性を考慮した設計法が必要。
・矢部川のような事例を考えると、点検・補修のみで対処することは難しい。
・ボーリングを細かく実施しないと評価できないというのでは困る。そのため、堤防内部の土質構造が分からないときのアプローチの仕方も課題である。

・たとえば、堤防が被災した箇所で、次の出水で被災するかどうかは、現状では予測できない。調査しても自信が持てない。何を調査すれば予測できるかも明確でない。
・起こったことの説明はできるが、予測はできないのが現状である。
・信頼性解析では、過去の事例が少ないことや、メカニズムがよく分かっていないこともあって、criteria が決められないことが課題になっている。
・破堤の数は少ないが、一歩手前の被災は数が多い。それをどのように生かすかが重要。
・堤体の土質構造は非常に複雑なため、調査には限界がある。
・概略点検や詳細点検を行って危険性を判断しているのが実状であるが、矢部川のような事例をみると、本当のところは分からないというのが現状ではないか。
・危険なところを抽出するためには何を調査すればよいか、分からなくなっている。
・治水地形分類図の情報は有効である。
・堤防横断面で考えるだけでなく、縦断方向の水の流れ等を考えることも重要。
・安全性の見方は、HWL を経験したかどうかによっても異なる。ＨＷＬを超えたことがある河川はそれほど多くないのが実態である。
・進行性破壊にとっては、ピーク水位だけでなく水位の継続時間が重要。
・進行性破壊を止めるための有効な対策方法も分かっていない。
・実際の現象を見ることが重要であり、それをもとに一連のプロセスをモデル化する必要がある。一例として、桐生川の堤防では、流動層に水位観測孔を設けて出水時の応答を観測しており、現象の一端を捉えることを試みている。
・パイピングについては、土の粒子がどのように動いていくかが分からないことが課題。
・パイピング破堤を把握するための調査密度についての議論も必要。
・治水地形が異なる箇所で、地下水の流れがどのように違うかを実証することも重要。
・観測を行う場合には、弱点がどこにあるのかを考える必要がある。

■今後の研究課題について
・以上の議論を踏まえて、服部リーダーより、今後の研究課題について総括があり、次頁のメモが示された。

■ロードマップで取り扱う項目

- 進行性破壊（HWL 超過が破堤に直結する条件、しない条件）
  - 外力（水位差、その継続時間・・・・）
  - 土質構造（砂層の厚さ、平面分布・・・・）
  - 複合的な破壊の進行（すべりの併発・・・・）
  - 「進行」を抑えるという観点での対策工
- ボーリングが多数できない、地盤構造がすべてお見通しにならないという前提。これに対して如何に対処するか？
  - 逆の見方：土質調査が完璧ならば弱点箇所が特定できるか？
    - 例えばロードマップの項目
      - 現地での被災事例調査
      - メカニズムの解明（破壊閾値の設定）
- 既存の見方：例えば治水地形分類図
  - どこまで判断できるか。一回追い込んで議論する。
  - 調査重点箇所の絞り込み(スクリーニング)はできるか？など
  - その上で他の技術の連携など、さらなる技術改善の方向性
- 過去の経験水位（外力）・被災履歴（結果）
  - HWL 経験した河川・していない河川
  - その際、変状が生じた河川、無事だった河川
  - こうした経験をどう活かすか？
  - そもそもそうした履歴を整理していない。まず、書いてみれば？
- 実大・本物の破壊現象を調べることの意義
  - これまで考えていた破壊機構：ほかにもあるのでは？
  - 破壊に至る前兆：例えば堤内水位変動・水位差で大まかにつかめるのでは？
- 調査の仕方
  - 土質構造の調査（ボーリング）
    - 基礎地盤：被災の関連性：特性は分かった
    - 堤体はそういう傾向見えない（ばらばら）
    - 目的に応じた精度での分析→それに適う調査の仕方
  - 堤内の水・土砂の挙動
    - 仮説を検証する
      - 例１：治水地形分類図の経験的知見を裏付ける
      - 例２：なんとなく定着している破壊現象の定型的な見方を検証する

６．今後の取り組みと予定

・次回までに、上記メモを２～３の項目に整理して、それに関連するネタを各自持ち寄って整理する。既往資料の抜粋でも可とする。

・メンバー全員から事前に送っていただき事務局で集約する。

・次回の開催予定は以下のとおりとする。

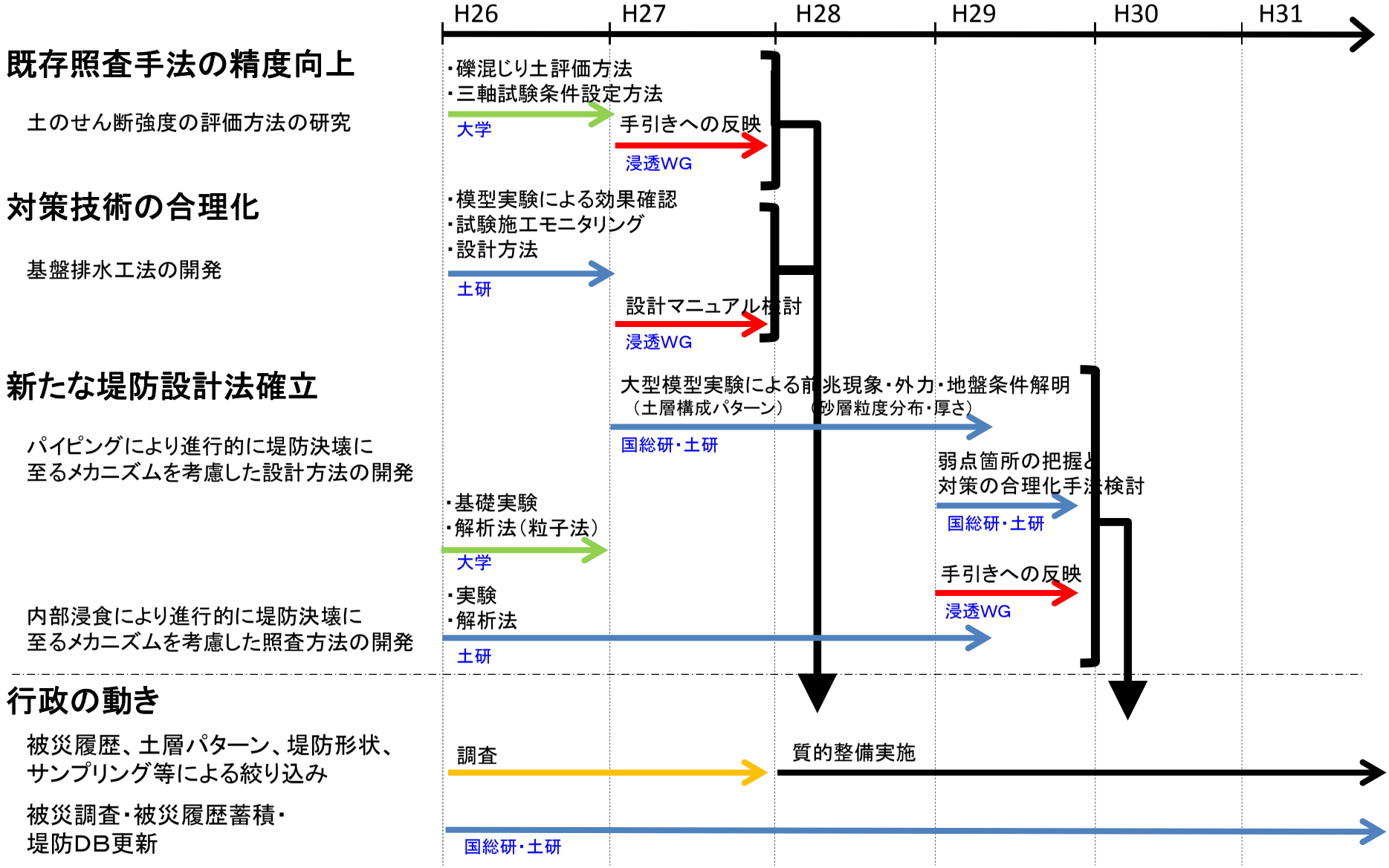
開催日時：12 月 9 日（火）　9：30～11：00

開催場所：地盤工学会　地下大会議室

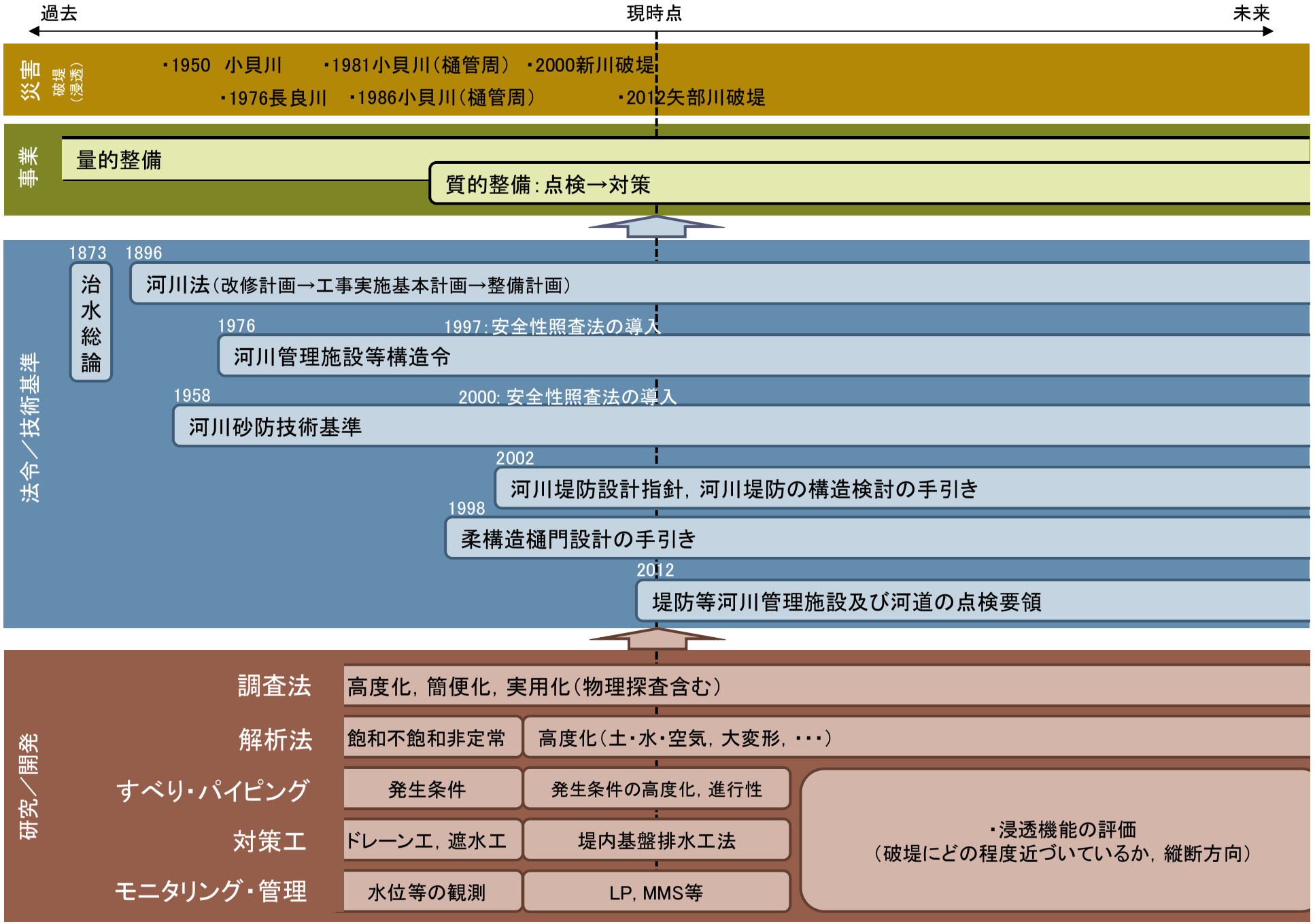
以上

浸透研究開発ロードマップ（案）

堤防強化に関する行政現場からのニーズと研究開発のシーズを組合せ、中期的な研究開発の道筋を示すもの。今後の研究開発の進展等を踏まえ、随時見直し。



【7－4　河川堤防】


過去
現時点
未来
災害
破堤（浸透）
・1950　小貝川
・1981小貝川（樋管周）
・2000新川破堤
・1976長良川
・1986小貝川（樋管周）
・2012矢部川破堤
事業
量的整備
質的整備：点検→対策
法令／技術基準
1873
治水総論
1896
河川法（改修計画→工事実施基本計画→整備計画）
1976
1997：安全性照査法の導入
河川管理施設等構造令
1958
2000：安全性照査法の導入
河川砂防技術基準
2002
河川堤防設計指針，河川堤防の構造検討の手引き
1998
柔構造樋門設計の手引き
2012
堤防等河川管理施設及び河道の点検要領
研究／開発
調査法
高度化，簡便化，実用化（物理探査含む）
解析法
飽和不飽和非定常
高度化（土・水・空気，大変形，・・・）
すべり・パイピング
発生条件
発生条件の高度化，進行性
対策工
ドレーン工，遮水工
堤内基盤排水工法
モニタリング・管理
水位等の観測
LP，MMS等
・浸透機能の評価
（破堤にどの程度近づいているか，縦断方向）

【７－４　河川堤防】説明文

古事記や日本書紀に仁徳天皇の命により淀川（古川）に堤防（茨田堤：まんだのつつみ）が築かれたことが記録されているように，河川堤防は古くから営々と築かれてきた．治水技術が発達したのは，戦国時代から江戸時代にかけてであり，戦国時代では武田信玄のいわゆる甲州流などが有名である．この時代に現在日本人の多くが生活を営んでいる沖積平野において，河川の両側に沿った堤防が多く作られるようになった．大規模な治水事業では利根川の東遷や木曽三川の分流を行った宝暦の治水工事が代表的である．

次に，堤防整備が進んだのが，明治以降である．明治初期にはオランダからファン・ドールンやデ・レーケらの技術者が招かれ，堤防技術の指導にあたった．明治６年にファン・ドールン（般道論）が出した「治水総論」には，天端幅や高さ，のり勾配の横断形状についての具体的な規定が含まれている．この横断形状等を規定する考え方は，河川砂防技術基準や河川管理施設等構造令にも引き継がれ，現在でも流量に応じた天端幅や高さなどが規定されている．

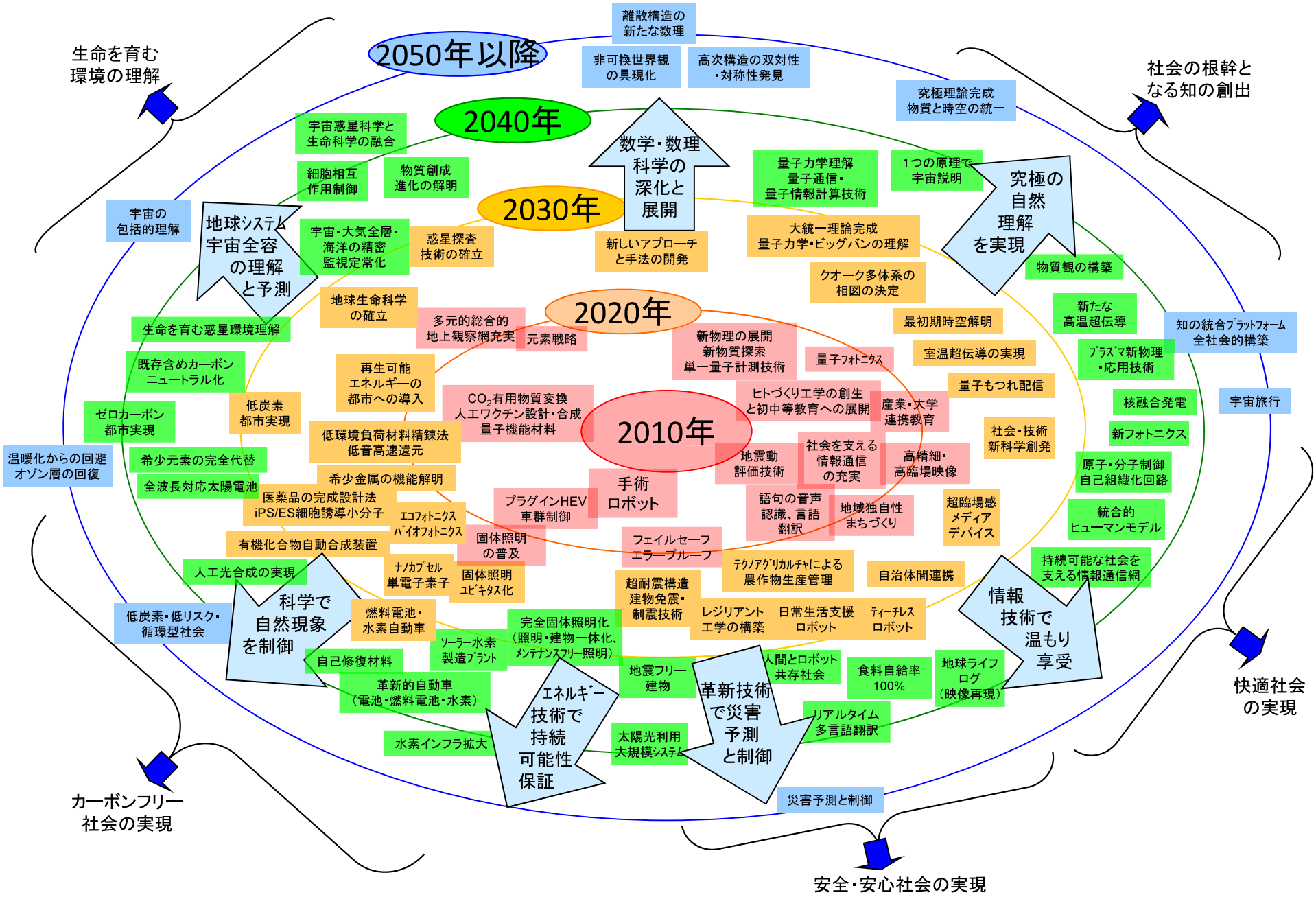
その後，1997 年には河川砂防技術基準が，2000 年には河川管理施設等構造令が改訂され，形状規定だけでなく，堤防にかかる水位や降雨の外力を設定し，これに対して堤防の安全性を照査する方法が導入された．安全性照査の導入は，それまでの浸透流解析や堤防の浸透機能に重大な影響を及ぼすすべり崩壊やパイピングに関する研究，対策工の効果や設計法に係る研究の進捗があって可能となったものである．

これらの技術基準等に従って詳細点検を直轄河川堤防で実施した結果，約 4000 ㎞の延長で安全性が不足し，現在でも約 3000 ㎞が未対策の状態となっている．この膨大な延長に対して，効率的に対策を実施していくことが現在の課題となっており，幾つかのアプローチが考えられる．その一つが調査の高精度・高密度化である．河川堤防は古くから嵩上げ，拡幅を繰り返してきていることから，横断方向にも縦断方向にも不均質な土質構造を有する場合が多い．築堤履歴を調査・記録するだけではなく，地盤調査をできるだけ高い精度・密度で実施することが望ましい．しかし，膨大な延長に対しては，単に高精度・高密度化するだけでなく，簡便でなければ実用的とは言えない．物理探査等も含めた調査法の開発・実用化が望まれる．二つ目は，すべりやパイピングなどの破堤に繋がりかねない被害の発生条件の高度化や進行性の評価である．例えば，パイピングによって破堤した矢部川において，破堤した箇所以外にも多数の漏水が生じており，破堤した箇所だけが破堤した理由と他の箇所で破堤に至らなかった理由を明らかにすることによって，パイピングによる破堤のメカニズムや変状の進行に着目した絞り込みが可能となる．このようなメカニズムや変状の進行を対策工の設計法に取り入れることによって，より合理的な対策工の設計が可能となると考えられる．また，解析法の高度化は，メカニズムの検討だけでなく，点検や対策工の設計に関しても期待されるところが大きい．３つ目が安価な対策工法の開発であり，例として堤内基盤排水工法を記載した．

これらの研究／開発上の課題はあくまで当面の課題である．すべりやパイピングによってどの程度破堤しやすくなるのか，あるいは，一連区間の堤防を縦断方向にどう評価するかなどの浸透機能の評価に係る課題を，将来取り組むべき課題の一例として記載した．これら以外も含め，より合理的な構造が可能となるよう，様々な角度から研究に取り組んで行く必要がある．

Ⅱ．理学・工学分野全体のロードマップ

理学・工学分野における科学・夢ロードマップ



地盤工学委員会堤防小委員会「浸食・浸透破壊・洗掘 WG」＋水工学委員会河川部会「堤防 WG」

平成 26 年度第 2 回（第 7 回）合同会議　議事録（案）

日　時　：　2014 年 12 月 9 日（火）9:30～10:00
場　所　：　地盤工学会　地下会議室
出席者　：　[浸食・浸透破壊・洗掘 WG]
前田，佐々木，坂本，小高，高橋，石田，丹下，竹下，藤本，與田，森，李，----
[堤防 WG]
服部，溝口，内田，阿部，----

（敬称略）

■議題

１．堤防技術の研究開発ロードマップの作成について
２．次回開催予定

■配布資料

堤防ＡＲＭ（アカデミック・リサーチ・マップ）

■議事内容

１．堤防技術の研究開発ロードマップの作成について

・森委員と溝口委員より、堤防ＡＲＭ（アカデミック・リサーチ・マップ）の提示があり、その内容について説明があった。
・堤防ＡＲＭには、「決壊に至る**メカニズム解明**」、「危険箇所把握のための**調査**」、「決壊可能性把握のための**評価**」、「堤防決壊抑制のための**対策**」、「機能確保のための**維持管理**」の５つのテーマについて、現状の技術的課題が整理されている。次回は、これらのテーマに関する研究課題を全員で議論する。
・次回までに、各委員が考える研究課題（キーワード）を付箋に書いて持ち寄り、図中に貼り込んでいく。
・付箋は、対象とするスケールにより以下のように色分けする。
　土粒子レベル→黄色、実験室レベル→ピンク色、実物大レベル→青色
・キーワードの数は、１人最低３つ以上、２テーマ以上とする。
・研究課題については、ある程度まとまっているものと、まったく手がついていないものがあると思われるが、前者については、できる限りＡ４版の概要資料を持参する。
・研究課題に関するキーワードの例としては、以下のものが考えられる。
　調査　→　物理探査の実用化、間隙流の速度
　評価　→　浸透破壊に対する解析手法、パイピング発生の限界流速
　対策　→　堤内地基盤排水工
・耐震に関する課題については、「耐震対策の浸透に対する効果」など、浸透に絡めた形で記載する。
・作成したロードマップ等については堤防研究に関する一つの道標とするために、冊子等にまとめて発表することを考える。たとえば５年ごとに内容を見直すことも考える。

・次回は、浸透ＷＧにも参加していただくことになった。

２．次回開催予定

開催日時　：　１月８日（木）　15：00～18：00
開催場所　：　地盤工学会　地下大会議室

以上

堤防ARM（アカデミック・リサーチ・マップ）

長期

中期

短期

課題

JSCE 地盤工学委員会堤防小委員会 浸食・浸透破壊・洗掘 WG
JSCE 水工学委員会河川部会 堤防 WG

平成 27 年 第 1 回(第 8 回) 合同会議 議事録(案)

日　　時 ： 2015 年 1 月 8 日(木) 15:00～18:00
場　　所 ： 公益社団法人 地盤工学会 地下会議室
出 席 者 ： 敬称略
[浸食・浸透破壊・洗掘 WG]
前田(WG ﾘｰﾀﾞｰ)，佐々木，坂本，石田，岡本，小高，高橋，丹下，森，與田，李
[堤防 WG]
服部(統括，WG ﾘｰﾀﾞｰ)，松本，溝口，内田
議　　題 ： 堤防 ARM(アカデミック・リサーチ・マップ)に関する意見収集
配布資料 ： ①丹下委員：河川堤防周辺の湧水現象について他
②内田委員：侵食・浸透破壊・洗掘の解析手法に関する考察
③松本委員：基盤の透水性に関する連続観察他
④森委員：河川技術分野平成 27 年度新規公募課題
⑤小高，李委員：既往研究・検討論文録
⑥前田委員：piping 侵食速度を用いた外力波形に応じた危険度評価破壊
⑦石田委員：地中レーダーによる路面下の空洞探査について他
⑧坂本委員：堤防の被災に関する疑問
⑨阿部委員：河川堤防の浸透破壊に関する研究課題の例
⑩高橋，岡本委員：河川堤防の強化の取り組みについて（案）
⑪溝口委員：パイピングによる破堤過程と「月輪工」の効果の評価
次回予定 ： 2 月中に行う。
議事内容 ：

堤防 ARM の作成にあたって，同心円の短期：5 年，中期：10 年，長期：20～30 年堤防の期間として，「危険箇所把握のための調査」，「決壊可能性把握のための評価」，「堤防決壊抑制のための対策」，「機能確保のための維持管理」のどの分野に現場で役に立つ研究なのかをベクトル方向に位置づけるもので，中心の「すべり，パイピング，侵食により決壊に至るメカニズム解明」は現時点で未解明なものとしている。このマップに，各委員からの課題や研究方針を貼り付け整理しこの WG の成果とする。できた堤防 ARM は，決壊に至るメカニズムの解明に向けて，各分野における研究課題を明確にし，集中投資するなど今後の堤防研究の方向を示し，研究戦略における資料とする。なお，キーワードや意見は，スケールを示す物として，黄色付箋：土粒子レベル，ピンク色付箋：実験室レベル，青色付箋：実物大レベルとする。

- 「速度」には大別して 2 つあって，土粒子の中を流れる透水速度と，パイピングのように掘れていくような侵食速度がある。現在，地盤中のこれら速度を直接計測することが難しい。しかしながら，これを測らないと限界流速のような土粒子が移動する条件や進展する条件を規定する外力としての速度を決められない。そこで，この計測に関わる技術開発が必要である。
- 土粒子が流れていなくても間隙水圧により強度を失っている場合のように，侵食のフロントを定義する必要がある。対策工など考える場合はこの侵食を定義する必要がある。そこで，侵食速度，浸透速度を計測することは重要と考える。材料分野では破壊速度を定義している。
- 粒子濃度として清水なのか，土砂流なのかで評価することができるのではないか。地学分野では，流速にかかわらず粒子濃度で乱流は起きないとか堆積するとかを評価している。そこで，この濃度を計測する技術も重要と考える。
- 現行の堤防評価では，評価に用いる調査頻度に差がある。今後は，調査頻度により評価値に安全率を付加することや調査頻度によっては評価できないと判断することが必要と考える。
- 資料①より，湧水が発生する箇所は，多年度にわたり同じ場所で発生している。この事例では，平面的に行き止まり地形になっていることが要因と推察される。
- 現在の浸透流解析はダルシー則を用いており，層流が適用範囲であることから，乱流など層流以外の流速の場合に侵食が発生するならば，非ダルシーを考慮した支配方程式による浸透流解析コードが必要ではないか。
- 水みちがチャネリングして連通したような場合は，速度勾配が支配的となるような速い流れとなることから非ダルシー的な実流速を考えなければならない。このような現象が発生する場所は，樋門と地盤や粘性土と透水層との境界で発生しやすいと考えた場合，透水係数の差に着目する必要がある。破堤まで進行するような場合，実流速が大きくなり土塊移動を伴う水みちが形成され連通することによると考えられる。二次元矢板などの場合，限界動水勾配に達して有効応力は失われていても，土粒子の移動が発生しない時には大きな破壊には至らないこともあることから，土粒子の移動が発生しうる実流速を明確にすることは重要な課題である。
- 透水係数のコントラストで圧力水頭勾配が顕著となり流速も変化することも重要ではないか。
- 現状の解析では，土と水を扱う場合，どのようにひびが入り，その後どのように水が流れるかというモデルができていない。つまり，水を使って土との相互作用が解析できない。
- 表面流によって侵食され掘れていく場合は，流れを三次元で解いて土粒子は流砂モデルのようなものを適用すれば基本的に何かは解析できると思う。しかしながら，土粒子が動き出す時の水と土の相互作用を示すモデルはあるが，ほとんど使えるような状況にはない。水理計算では基本的に乱流を対象としたモデルでレイノルズ平均した流れのモデルを使っているが，浸透系のモデルは空間平均のモデルとなっており透水係数で扱い間隙のポーラス流れとなっている。相互作用を扱う場合，レイノルズ平均した後空間平均するか，空間平均した後レイノルズ平均するかなど問題で，浸透のダルシー的な流れと非ダルシーの流れとその上方の完全乱流の流れを本当に解けるのかということを厳密に考えると難しい。実験室レベルならば水と砂ならば何とかできるとも考えられるが，シルトも考えなければならないことを考えると土の応力も空間平均で考えなければならないなど難しい課題である。
- 植生が入ってくると，化学的な応力伝達を考えなくてはならなく，難しい課題である。
- 土粒子の動きは拘束圧に依存しているのではないかと思う。

- 有効応力が無くなっても土粒子が動かなければ安定している。つまり，土粒子が動くきっかけのメカニズムを明確にしなければならない。
- 土粒子の動きを，発生と発達とに分けて考える必要があるのではないか。
- 土の有効応力を考えるとき水の流体力を考慮した土のモデルでクラックが入るレベルや破壊するレベルを説明できないか。
- 有効応力は直接測ることができない。
- 土の変形と流体力に着目した壊れ方に対してどのようにモデル化していくか，どのような見方をすべきなのか，そのためには，侵食速度，浸透速度など何を測ればいいのか，有効応力そのものを課題として取り扱うことはできないのか。
- 土というのはバラツキが大きい，地形も一様でない，どのようなスケールでモデル化すべきか。
- すべり破壊を考える場合，一様な地盤ではこれまでの考え方でいいと思うが，透水係数の異なる地層がある場合，透水係数の違いにより圧力が変化すると考えられることから，この発生圧力を考慮したモデルを考える必要があるのではないか。
- 粘性土のすべり破壊では，これまで浸潤による強度低下は起きない仮定で扱っているが，シルトを含んでいるものなどでは強度低下が起きることを考えなければならないのではないか。
- 法先が崩れ，のり面全体が崩壊するような進行性破壊を，境界条件が変化しているととらえた場合，対策としては境界条件となる部分を破壊しないようにすれば有効なのではないか。
-
- 物理探査の結果では，この結果だけで堤防の質的評価はできない。しかしながら，面的に土性をとらえることができるのではないか。
- 空間的に密度が正確に測れない。
- 水の集まりやすい場所を面的にとらえられる調査はないか。広域に透水性を測ることができないか。
- 群馬大学における基盤の透水性に関する連続観測結果では，ポンプ施設に近い観測孔と約 20m 離れた観測孔では，離れた観測孔の方が，ポンプによる揚水の影響を受けている。仮説ではあるが，約 40 年ポンプを稼働している影響で近い観測孔周辺の基盤の透水性は変化したと考えられる。これより，被災した場所の近傍にポンプがあったかどうかという観点を考える必要があるのではないか。
- 多点温度検層から地下水流速を測ることができるのではないか。FDV による浸透流速を計測した結果，非常に大きい流速となっていた。
- 不飽和地盤の透水試験が必要である。現在，地盤工学会で調査法をまとめている。
- 礫質土の粒度特性を正確に把握するための調査が必要である。
- 礫質土の強度特性，限界動水勾配の評価が必要である。粒径が大きく粒状体としての性質が顕著になるにつれて，通常の限界動水勾配の考えに合わなくなってくることが考えられる。
- 透水係数のコントラストで堤体内の圧力分布が変わるので透水係数の把握が重要である。
- 治水地形分類図で要注意地形を考慮しても二次元断面モデルでは正確に判断できていないのではないか。
- 治水地形分類図や河川の変遷などから土の堆積状況が判断できると思うので，それを調査できる手法があればよいと思う。地学では，石油探査で粒子の配向で堆積状況がわかる。

- 堤防の弱点がわかれば，それを面的に探査すればよいのではないか。事例として，MMS の活用など。
- 現地で考えるバラツキを考慮した調査結果と要素試験などから点で密に調査した結果，さらには解析モデルのスケールとを相互に考えた検討モデルが必要である。
- 土のバラツキとどのようにつきあうかを明確にしていかなければ，解析モデルも進まないのでは。
- バラツキをモデル化するのではなく，被災の実績からモデルを検証する。随時アップデートしていく。
- 堤防工学は，地盤工学だけでなく水理学だけでなく，どのようにバラツキにつきあうのかが重要ではないか。
- 過去の経験水位と被災履歴を整理する必要がある。
- 河川堤防の破壊において何が支配的かをメカニズムからわかれば，その調査を徹底的にやる必要がある。
- 河川堤防が破堤に至ったのは，土層条件，境界条件，外力条件など，なんからの特殊な条件になった時であるが，被災後調査による検証によって，この特殊性の中から破壊条件の一般性を明確にすることが重要である。
- 地盤だけで判断するのではなく，外力との関係を明確にする必要がある。

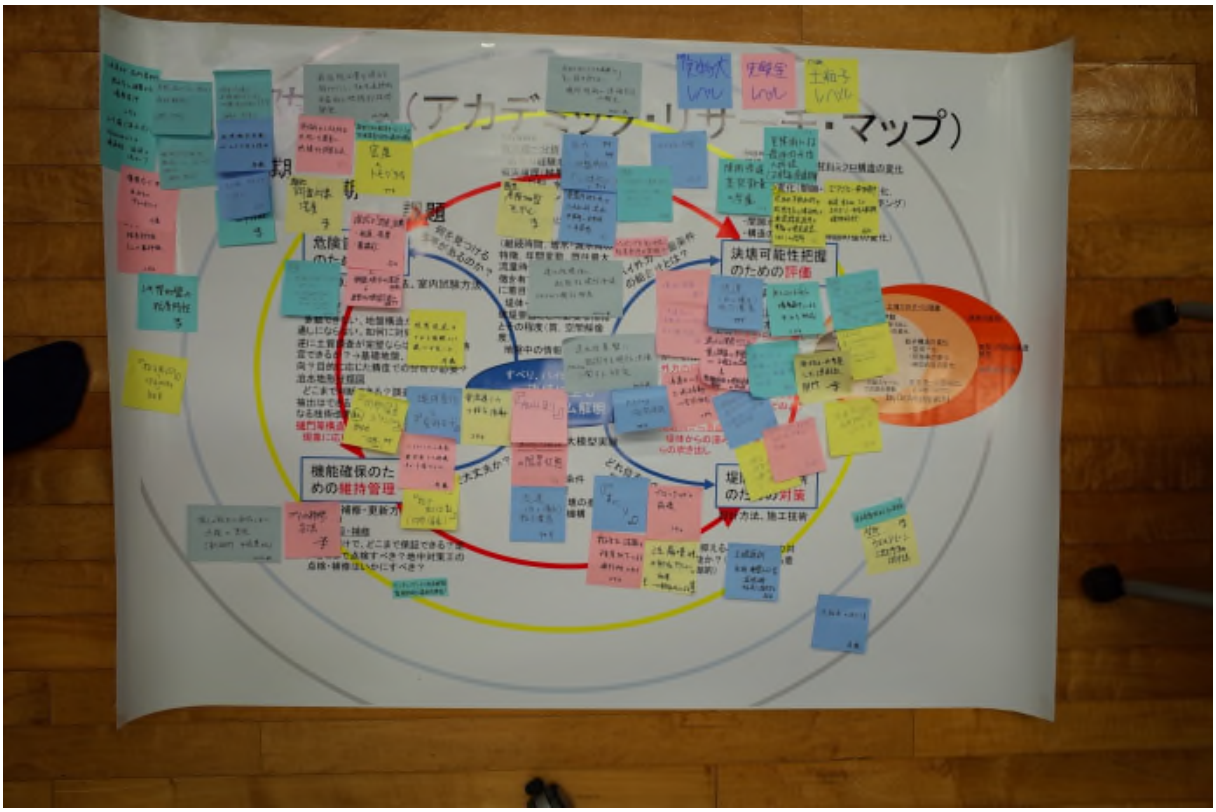
- 噴砂が発生した後の補修方法を検討する必要があるのでは。
- 旧河道だから危険なのではなくて，弱層が連続していることを調査しなければいけないのではないか。
- 旧河道の互層の透水係数のコントラスト，砂層，砂礫層の連続性，三次元的分布など，調査のポイントを明らかにすべき。
- 被災調査の際，漏水量，噴砂の量を計測することで，堤体評価の基礎データにならないか。
- 経年的に長く，漏水，噴砂が発生しているが堤防は変形していない場所の安全性はどうなのか。
- 経験は重要だが，経験は積み重ねることが重要だし，その経験を技術化することが重要である。
- 地盤の弱部がわかっても，外力の継続時間によって破壊の形態が異なる。地盤特性と外力の特性を一体のものとして議論すべきではないか。
- 浸透流解析において，蒸発散を考慮する必要があるのか。実降雨を入れてシミュレーションできていないことが課題である。
- 浸透流解析では，初期飽和土を考慮した不飽和特性を設定することが重要である。
- 堤防の不均質性がエアブロー現象に関係している。
- 旧河道や矢板の効果などをモデル化するためには，三次元モデルが必要と考える。
- 危険な境界条件（土層モデル）を明確にする必要がある。
- 浸透流解析における初期水位，不飽和，降雨浸透などの特性モデルを明確にすることが重要で，対策工も考えられるのではないか
- 対策を実施する際，どこからやるかを堤防工学的観点から外力も含めた危険度評価できれば優先度を設定することが可能である。
- 一番最悪なシナリオを想定すればよいという考えでは，予算が決まっている中では過大な対策が必要な箇所が増えてしまう．このことについてどのように考えるのかを議論すべきでは。

- 実験結果を有効に利用するためには，相似則を考えなければならない。

- これらの意見・議論を集約し堤防 ARM を完成させ，河川技術シンポジウムで報告を行う。

以上

（ARM全体）



（左下）

機能確保のための維持管理
のための評価
大模型実験
方法、施工技術

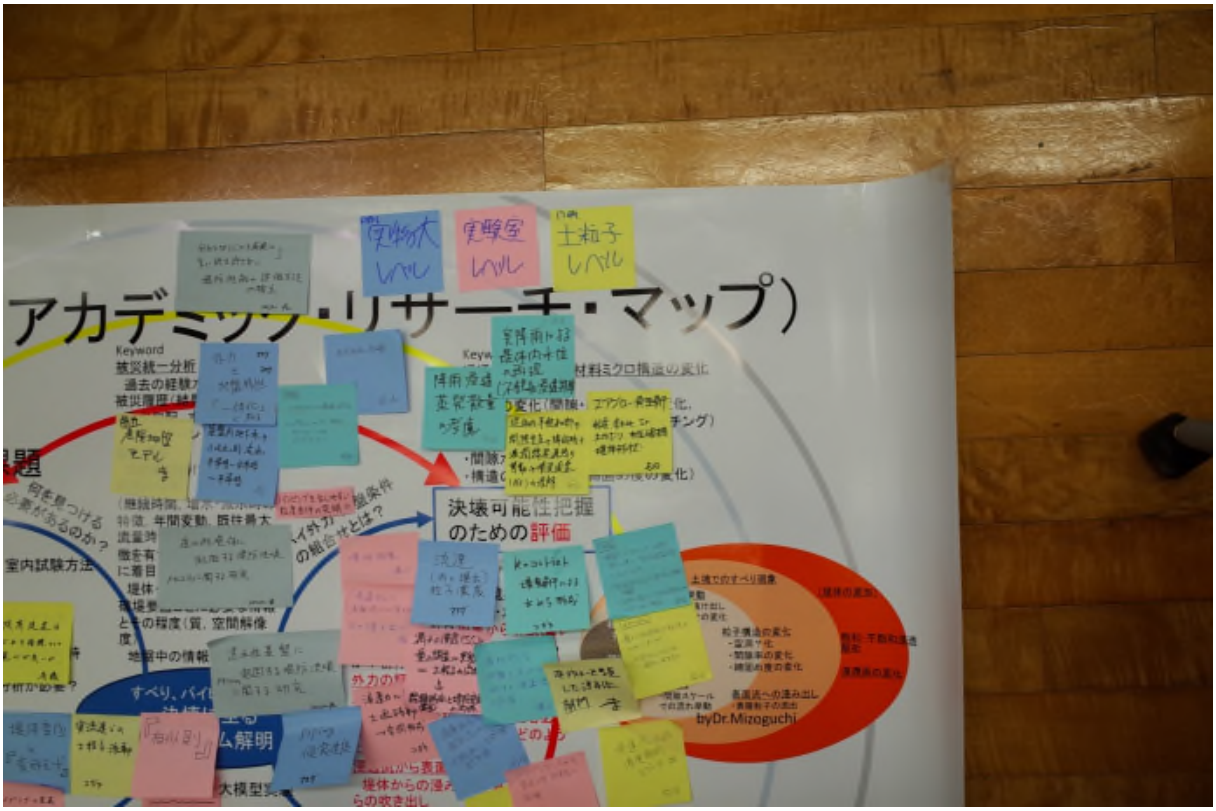
（右下）

課題
決壊可能性把握のための評価
大模型実験
方法、施工技術
by Dr.Mizoguchi

(左上)

課題
決壊可能性把握のための評価
機能確保のための維持管理
実験室レベル
土粒子レベル

(右上)


アカデミック・リサーチ・マップ)
決壊可能性把握のための評価
実験室レベル
土粒子レベル
byDr.Mizoguchi

堤防ARM（アカデミック・リサーチ・マップ）

長期　中期　短期

課題

資料２

堤体内の3次元的な不均一を簡易に把握する調査方法

Keyword
被災統一分析
過去の経験水位（外力）・被災履歴（結果）
動水勾配、水位差
土層パターン
被災調査
堤防設計時に代表すべき流況の特徴（継続時間，増水・減水時の特徴，年間変動，既往最大流量時の水位）→どんな特徴を有すればどの破堤要因に着目すべきか？
堤体・基礎地盤について破堤要因ごとに必要な情報とその程度（質，空間解像度）
地盤中の情報収集方法

Keyword
浸透流による堤体材料ミクロ構造の変化
・局所浸透流速
・構造の変化（間隙・締固め度の変化，細粒分の移動，かみ合わせ，アーチング）
振動による堤体材料構造の変化
・間隙水圧の変化
・構造の変化（間隙・締固め度の変化）

危険箇所把握のための調査

何を見つける必要があるのか？

資料調査、原位置調査方法、室内試験方法

Keyword
ボーリング
多数できない、地盤構造がすべてお見通しにならない。如何に対処するか？
逆に土質調査が完璧ならば弱点箇所が特定できるか？→基礎地盤、堤体で違う傾向？目的に応じた精度での分析が必要？
治水地形分類図
どこまで判断できる？調査重点箇所の抽出はできる？他の技術の連携など、さらなる技術改善の方向性はあるか？
樋門等構造物周辺の空隙調査？
現象に応じ　頻度，調査法を検討？

決壊可能性把握のための評価

ハイパイ外力・地盤条件の組合せとは？

モデル構築、解析方法

Keyword
河川工学と地盤工学の境界領域
堤体・基礎地盤の土砂・水はどのように移動するか？拘束から解放された土砂・土塊はどのように評価するか？粉体工学を参考？
外力の評価法（河道条件？）
水位変動が起こる時間スケール等流域・河道条件を評価に組み込む必要があるのか？あるとしたら，どのように把握するべきか？
浸透流から表面流への変化
堤体からの浸みだし，基礎地盤からの吹き出し

すべり、パイピング、侵食
決壊に至るメカニズム解明

被災調査、実大模型実験

Keyword
進行性破壊
外力、地盤条件
前兆の把握
複合的な破壊の進行
新たな破壊機構

機能確保のための維持管理

見るだけで大丈夫か？

点検方法、補修・更新方法

Keyword
点検項目・補修
目視だけで、どこまで保証できる？逆にどこまで点検すべき？地中対策工の点検・補修はいかにすべき？

堤防決壊抑制のための対策

どれ位までの変状なら許容できるのか？

設計方法、施工技術

Keyword
破壊制御
「進行」を抑えるという観点での対策工は可能か？（ドレーンもある意味破壊制御的）

堤体内不飽和部の間隙空気の降雨時+浸潤線発達時の挙動→噴発現象の理解

資料３

基盤内地下水の3次元的流れ
・平常時～出水時～平常時

資料１

基礎地盤コンサルタンツ株式会社
丹下　良樹

資料１　河川堤防周辺の湧水現象について

1. 過去の湧水現象

対象地では度々湧水現象がみられます。図１に平成 14 年、19 年、23 年に見られた湧水箇所と湧水の状況と現在の状況を示します。

図１　平成 14 年、19 年、23 年に見られた湧水箇所
湧水状況と現在（平成 24 年）の状況

2. 湧水現象のメカニズム

当地には、湧水現象を引き起こす要因が２つ考えられます。

① 地形的要因

図２に対象地の地形を示します。上流部に降った雨水の一部は地表付近の透水層に浸透し、それが伏流水となって標高の低い所へ流下します。対象地は標高が周囲に比べて低いので、伏流した水が滞留し易い条件にあります。このため、対象地では降雨と同時に地表近くの地下水位が上昇を始め、雨が止んでもしばらくは平時より高い地下水位状態を維持します。このように対象地は湿潤した状態が長く続き易い条件にあります。

② 地盤的要因

図３に対象地の地盤の模式図を示します。対象地には地表だけでなく地下にも水を通し易い地層が在ります（図３の黄色で着色された部分です）。この地層の水位観測を行った結果、思川と接続している可能性が高く、河川水位とほぼ同じ挙動・水位を持つことが判りました。

河川水位は出水時には対象地の標高より高くなることがあります。平時は中間にある河川の水や圧力が伝わり難い地層（図３の青色で着色された部分です）が蓋の様に河川水の浸透を妨げていますが、河川水位が高い場合やこの地層が薄い場所では、水圧に耐えられずに蓋が破れ地表に地下水が噴出する現象が生じます。湧水が見られる場所はこの様な場所と考えられます。

湧水の原因

上記より湧水現象は以下の原因によって生じていると考えられます。

「対象地は伏流水が滞留しやすい地形的要因をもち、かつその地下には河川水と接続する水を通し易い地層が存在する。河川の水位が上昇するとこの地層の水圧も上昇する。平時は中間の河川の水や圧力が伝わり難い地層が蓋のようにこの河川水の浸透を妨げているが、水圧が高い場合にはこの地層の薄い地点では上昇した水圧に地盤が抗しきれずに湧水現象が生じている。」

尚、河川堤防の出水時の安定性については、行政が示す検討方法により平成 14～18 年に調査検証がなされています。この結果に基づき必要な対策も施され、基準を満足する状態にあります。平成 19 年、23 年の湧水時においても堤防の変状は見られていません。これより、堤防から漏水して湧水現象が生じているのでは無いと考えられます（図 3 参照）。

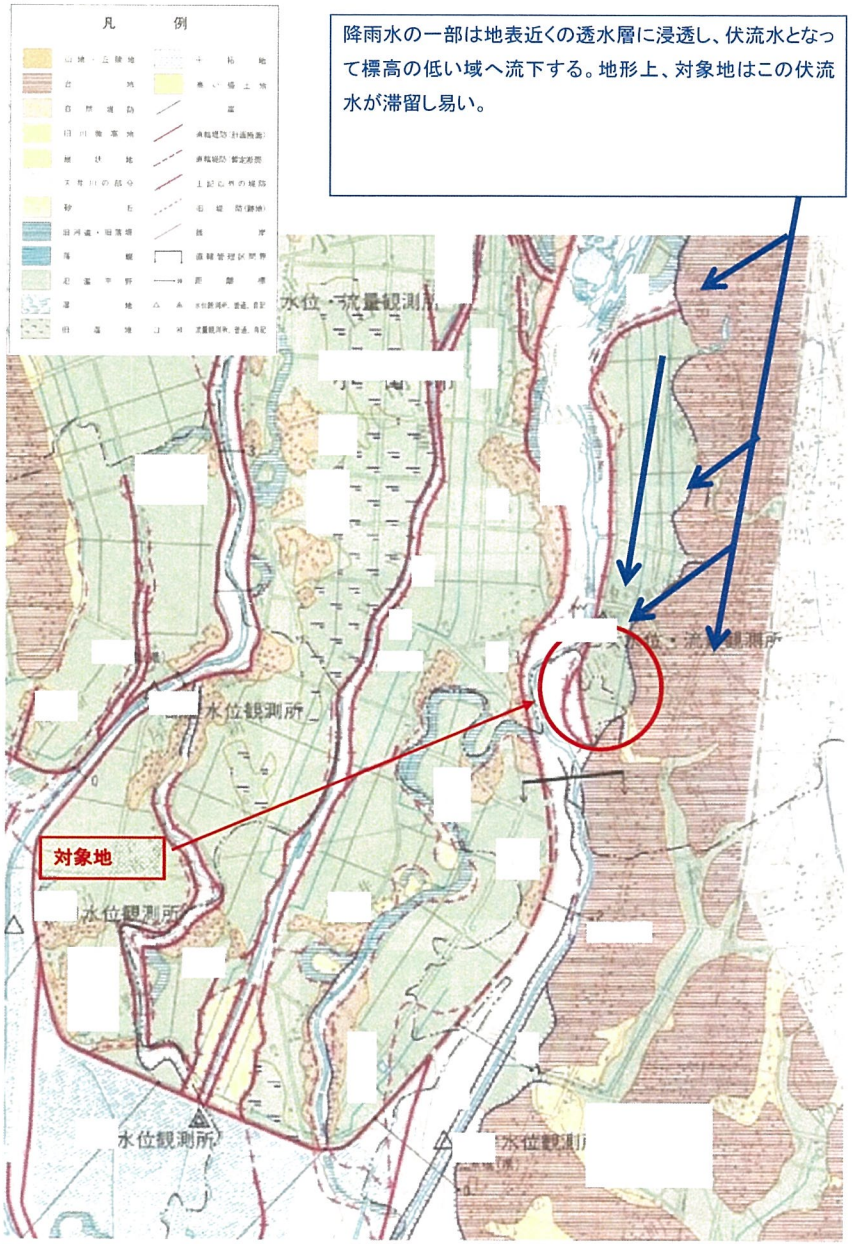
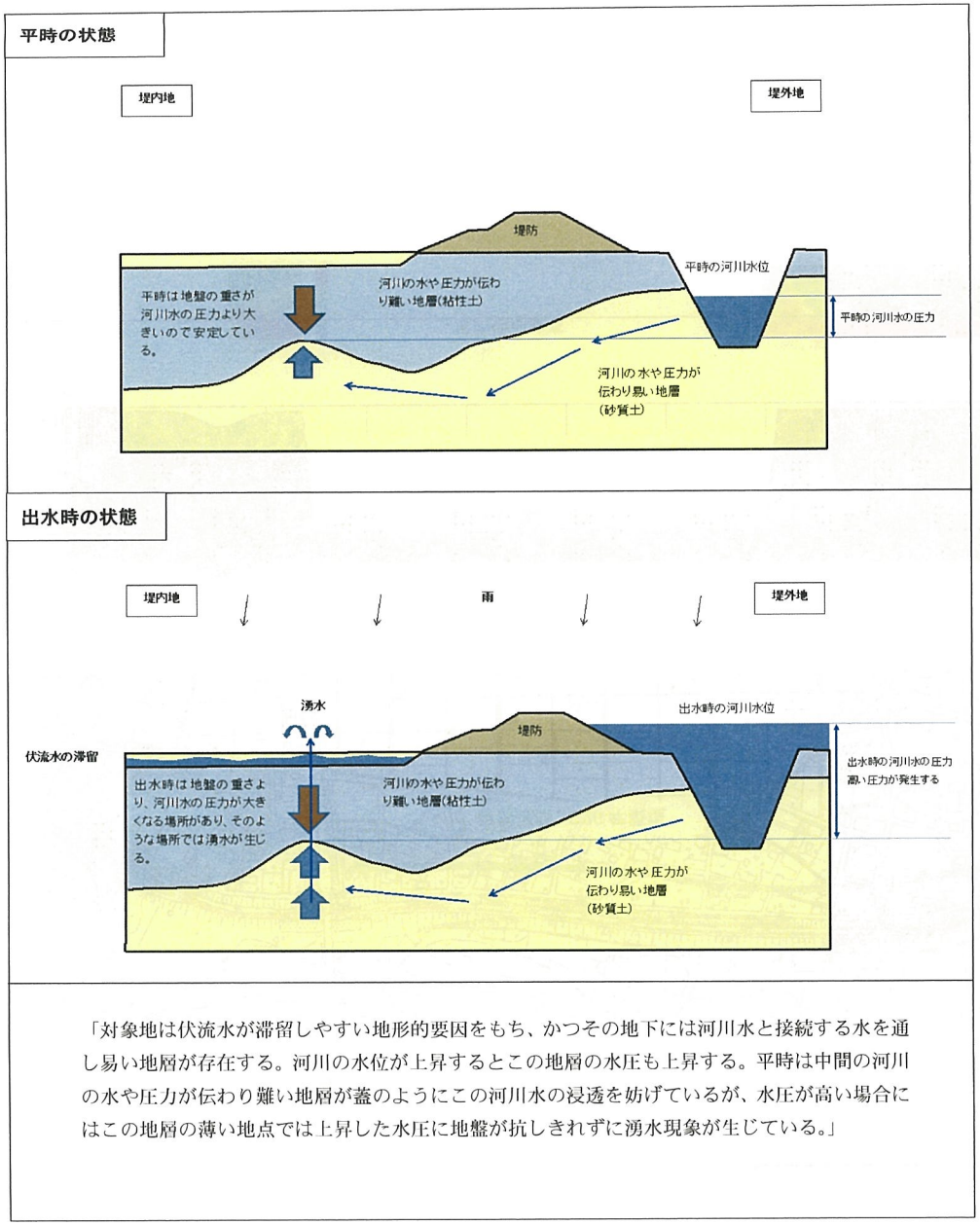
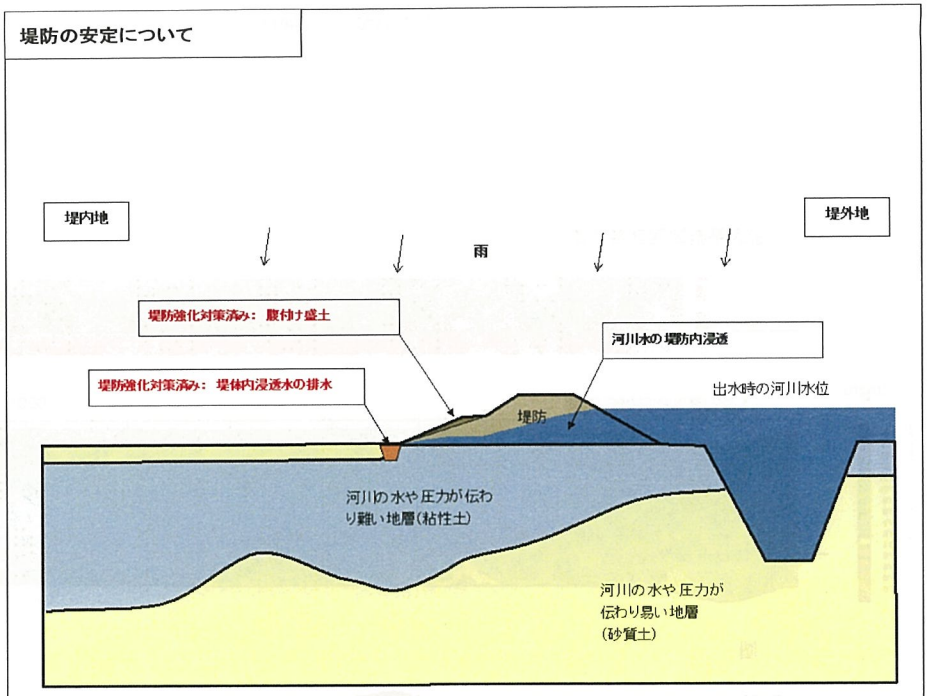


図２　対象地の地形（治水地形分類図　出典：国土地理院）

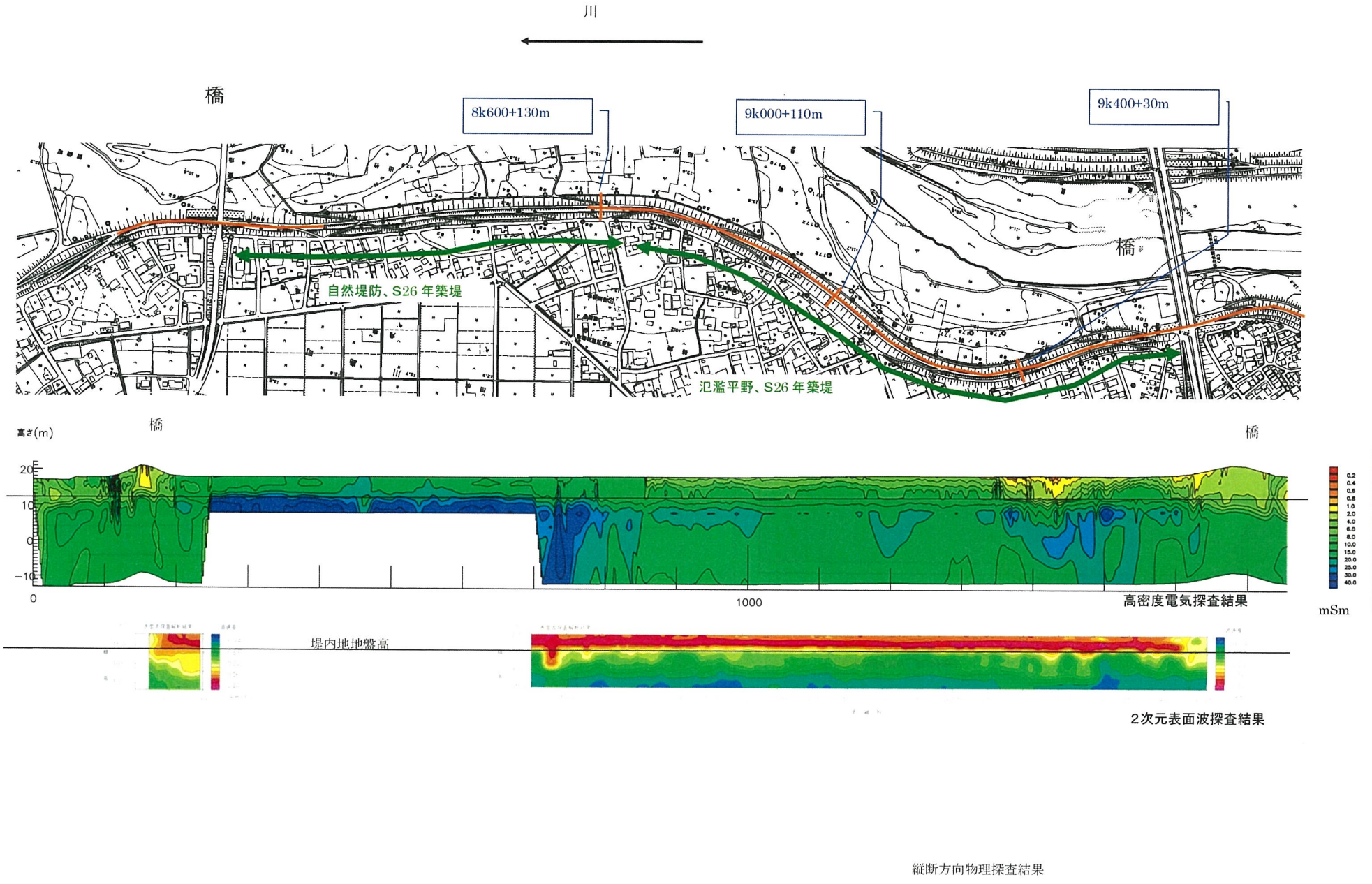


「対象地は伏流水が滞留しやすい地形的要因をもち、かつその地下には河川水と接続する水を通し易い地層が存在する。河川の水位が上昇するとこの地層の水圧も上昇する。平時は中間の河川の水や圧力が伝わり難い地層が蓋のようにこの河川水の浸透を妨げているが、水圧が高い場合にはこの地層の薄い地点では上昇した水圧に地盤が抗しきれずに湧水現象が生じている。」



河川堤防の出水時の安定性については、行政が示す検討方法により平成 14～18 年に調査検証がなされている。この結果に基づき必要な対策も施され、基準を満足する状態にある。平成 19 年、23 年の湧水時においても堤防の変状は見られていない。これより、堤防から漏水して湧水現象が生じているのでは無いと考えられる。

図 3　対象地の地盤の模式図



資料２　堤防縦断方向の高密度電気探査と2次元表面波探査の例

ジオシンセティックス論文集
第25巻(2010.12)

資料　3

研究開発論文

豪雨と気泡の影響を考慮した河川堤防における透気遮水シートの設置効果

前田健一[1]・柴田賢[2]・馬場千児[3]・桝尾孝之[4]・今瀬達也[2]

局所的な集中豪雨による河川堤防の損傷には，堤防表層部から浸透水による堤体の飽和化と堤体内浸潤線の上昇に伴う間隙空気のブローが関与していることが数値解析で想定されている．都市が発達する下流部の河川堤防は軟質な細粒分の多い砂質土から構成され，堤体内に封入された間隙空気による堤防の損傷を受けやすいと考えられている．本論文では，降雨発生装置を備えた模型堤防実験により，降雨浸透や河川水位の上昇に伴う間隙空気塊の挙動を把握した．無体策の堤体では降雨浸透や河川水位の上昇により空気圧の上昇やブロー現象が確認できた．遮水シートによる浸透防止対策工ではシート下位の間隙空気圧が上昇した．また，透気性のある遮水シート施工時は降雨浸透防止効果と間隙空気圧の上昇軽減効果が確認できた．

キーワード：集中豪雨，河川堤防，間隙空気，エアブロー，透気遮水シート

1．はじめに

局所的な集中豪雨が引き起こす河川堤防の損傷には，堤防表層部から浸透水による堤体の飽和化と堤体内浸潤線の上昇に伴い，間隙空気が浸潤線に取り囲まれ圧縮し，その後の堤体から押し出されるといったブローする現象（以下，エアブローと呼ぶ）が関与していることが数値解析で想定されている[1),2)]．2000年の東海豪雨水害の際には，名古屋市内を流れる新川の堤防が決壊し河川沿いに甚大な被害を及ぼした．この決壊過程の目撃証言が新聞[3)]に掲載されており，「堤防を斜めに横断する形で幅１メートルほどの亀裂が入り，白い泡状の水が噴き出した．その後，亀裂は３時間ほどかけてゆっくりと広がっていった．」と浸透破壊に間隙空気が関与を思わせることが報告されている．このような決壊時に堤防から空気が噴発する現象は，「ガマが吹く」と言われ，少なからず昔から目撃談があるようである．しかし，間隙空気のブローが堤体強度に影響するのかどうか，影響するとすればどのようなメカニズムなのか，ということは未だ明らかにされていないのが現状である．堤体を効率的に補強するためには，集中豪雨時の堤体内の間隙空気の挙動や堤体強度に及ぶす間隙空気の影響について検討が必要と考えられる．

また，気泡が発生するメカニズムは異なるものの，地盤が気泡の発生・発達によって損傷を受けることが報告されている[2),4),5)]．通常，浸透破壊現象は限界水位差に達すれば一気に崩壊する現象として知られている．しかし，砂地盤において間隙水が過飽和状態（水中溶存酸素量が高い水）の場合には，気泡間隙水中に理論飽和量を超えて溶解している空気が気泡として溶出し発達することで，限界水位差以下の水位差を保持し続けるだけで破壊することが示されている．この場合にも，発生した気泡が発達し下流側の地表面から噴出する毎に地盤内に緩み領域が発達することが観察されており，気泡が地盤の損傷を助長する．

一方，都市が発達する下流部の河川堤防は細粒分を含む砂質土や透水性のやや良い砂から構成された堤体が多いと考えられる．礫質材のような水や空気の流れが良い高透水材の場合や粘土のように極めて透水性が低く浸潤線の進行が極めて遅い場合には，エアブローが発生する可能性は極めて低いと判断される．つまり，河川の下流域の沖積平野の堤防において、エアブロー発生の可能性が最も高く，急激な降雨浸透によって都市部の堤体強度の低下を助長すると考えられる．

そこで，本研究では，降雨発生装置を備えた模型堤防実験により，降雨浸透や河川水位の上昇に伴う間隙空気塊の挙動を把握することを試みた．降雨浸透や河川水位の上昇によりエアブロー現象の観察や空気圧の測定を行った．また，遮水シートや透気性のある遮水シートを設置した際の堤防の補強効果について検討を行った．

2．実験方法および実験条件

(1) 実験装置および実験方法の概要

降雨および河川の水位上昇が堤防に作用するときの

[1]国際会員，名古屋工業大学大学院工学研究科　社会工学専攻，准教授（〒466-8555名古屋市昭和区御器所町）：[2]学生会員，名古屋工業大学大学院工学研究科　社会工学専攻，大学院生（〒466-8555名古屋市昭和区御器所町）：[3]正会員，応用地質（株）（〒102-0073東京都千代田区九段北4-2-6市ヶ谷ビル）：[4]正会員，太陽工業株式会社（〒154-0001　東京都世田谷区池尻2-33-16）

堤防への浸潤の様子から越流による堤体の破壊の様子を観察するために，**図－1**のような降雨発生装置を有し，底面以外は透明なアクリル面を有する土槽（幅 2000mm，深さ 550m，奥行き 500mm）を作製し用いた．水道水を用いて 3 本の噴霧ノズルから降雨を発生させ，土槽内に一様な降雨量となるためにノズルを長手方向に一定速度で往復運動させた．また，堤体の外部からは様々な方向から写真・ビデオ撮影を行うことで浸潤線を観測するとともに，**図－1**の裏面からアクリル面に約 30 箇所の開孔を設けて，堤体の奥行き中央に水分計やテンシオメータなどを埋設できるようにした．

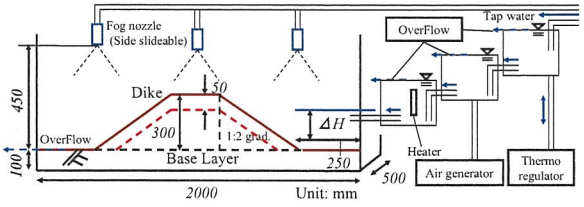


図-1　実験装置の概略

堤防下部の基盤層（層厚 100mm）は，極力飽和状態に近くするために，土槽底面に水を張った後，予め別容器で浸潤しておいた豊浦砂を水中落下させ作製した．相対密度 Dr=80%とした．堤体部は，浸潤線の様子を目視でも観察し易くするために豊浦砂の乾燥試料を用いて作製した．層厚 50mm ごとに空中落下させ突棒で突固め（100mm 平方当たり 7 回），相対密度 Dr=70%とした．本論文では，堤体高さを 300mm，1 対 2 の法面勾配とした．シートを設置する際には，**図－1**の赤破線部に示すように堤体の最終形状の表面から深さ 50mm に設定した．この場合，まず，**図－1**の赤破線部のような堤体を作製し，堤体の両法先 100mm の箇所から堤体表面を覆うように敷設した後に，50mm の土被り層を締固めて作製する．

降雨と堤外側の水位に関する水理条件としては次のように設定した．降雨強度を一定値124mm/hrとし集中豪雨相当を確保した．降雨有りの場合には，事前降雨として45分間与えた後に，堤外側に一定水位速度（30mm/min.）で給水し水位を上昇させる．これは，集中豪雨が発生し，その後，河川水位が上昇することを想定している．ここで，降雨の有無，シートの設置の有無，シートの種類によっては堤体内への浸潤速度が異なるため，河川水位が150mmに到達した際に，一旦，水位を保持し浸潤線の進入が安定するまで10分間保持した．その後，再び河川水位を上昇させ250mmに達したところで，10分間水位を保持し，堤体内部の浸潤や堤体の変状を観察した．250mmは天端のシートの位置と一致している．最後に，給水量を増やし，一気に越流させ堤体の損傷状況を確認した．

⑵ 実験ケース

本論文で結果を示す実験ケースを**表－1**に示す．まず，シートを設置せずに，降雨の影響について検討を行った（Case(0)と Case(1)）．ここで，Case(0)では比較のために降雨無しで堤外側の水位上昇のみ行い，Case(1)では，降雨による堤体上部表面からの浸潤を 45 分間与えた後，堤外側の水位上昇を行った．これにより，Case(1)は，堤体上部表面と堤外側からの両方からの浸潤を同時に受けることになる．

つぎに，堤体への浸潤や表面からの浸食を防ぐために，アスファルトフェイシング等が用いられることがある．それを模擬するために‘不透気遮水シート’を設置した実験を行った(Case(2))．シートには厚さ 0.5mm の塩ビシートを用いた（**図－2(a)**）．また，越流堤などには，設計マニュアルには明文化されていないものの，堤内からの圧縮空気を逃がすための空気孔が設けられていることがある．そこで，シートに透気性を持たせた透気遮水シートを使用することとした(Case(3))．ここで用いたシートは，スポーツウエアや雨具などの衣料品では一般的となっている透湿防水布と同質の性能を期待できるようにジオシンセティックス用途として開発された‘透気遮水シート’である [6-8]．今回の実験に用いた堤体は実堤体の 1/30 程度であるため，堤体内に発生する間隙空気圧も低く透気し難いと考え，直径 0.2~0.3mm 穴を 1~1.5 個／cm^2 に設置することとした．シートと堤体法面との摩擦を確保するために，薄くフレキシブルで凹凸がある摩擦性マット（透水・透気性は非常に高い）を敷いた．**図－3** のように粘着テープなどを用いて極力固定した．これによる堤防側面の変形の自由度は若干失われるが，シートと模型土槽側面のアクリル壁の間から水や空気が浸入したり抜けることがないように，水や空気に関する境界条件を明確にした．

表-1　実験ケース

Case (No.)	duration time of pre-rainfall (min.)	counter-measure sheet
Case (0)	-	-
Case (1)	45	-
Case (2)	45	unbreathable - waterproof
Case (3)	45	breathable - waterproof

(a) 不透気性遮水シート　(b) 透気性遮水シート

図-2　用いたシート状のジオシンセティクス

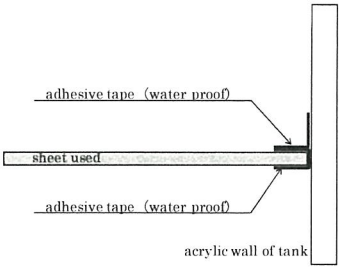


図-3　シートと水槽部の結合方法

3．実験結果および考察

降雨無しの場合（Case(0)）における，河川水位を250mmに一定に保持した後の浸潤線の経時変化（(a)から(b)）を**図－4**に示す．初期状態が乾燥した堤体を用いているので，浸潤線を明確に見ることができる．時間とともに（(a)から(b)），浸潤線がS字形状からなだらかな下に凸の形状に変化している．ただし，図から分かるように，浸潤によって色が異なる箇所は，必ずしも飽和度の高い浸潤域ではなく，毛管現象によって浸潤の進行方向に寄っていることが分かる．しかし，観察の容易さから，このような水分量の違いによる色の違う箇所を浸潤線の前線とするとともに，水分計による水分量の両方の結果を用いて考察するものとする．

つぎに，降雨有りのCase(1)からCase(3)のケースの浸潤過程の比較を**図－5**に示す．これらの実験ケースでは，堤外側（河川側）からの総給水量が等しい．また，堤体内に設置した水分計から計測した体積含水率の変化（$\theta - \theta_0$）（θ，θ_0はそれぞれ現在と初期の体積含水率）および水圧計の設置位置および値を**図－6**に示す．

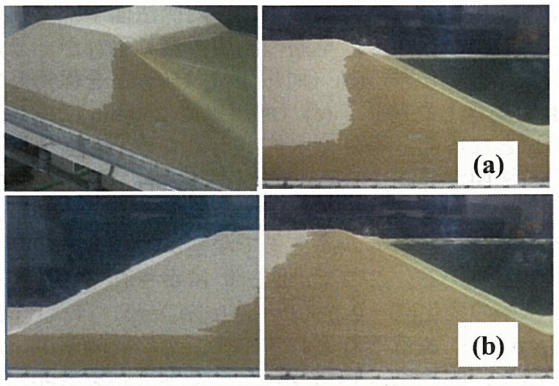


図-4　浸潤線の経時変化：Case(0)（降雨無し・シート無し）の河川水位250mmの場合

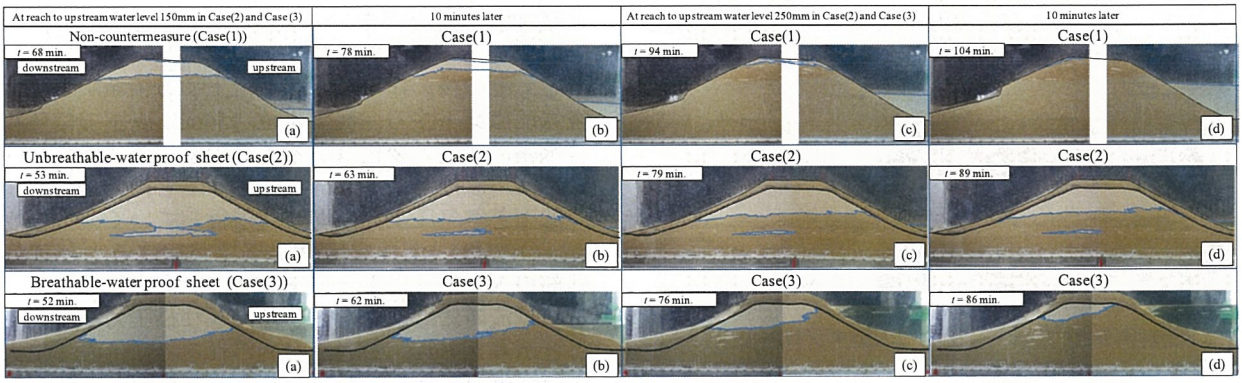


図-5　浸潤過程の比較：上から Case(1)（降雨有り，シート無し），Case(2)（降雨有り，不透気・遮水シート），Case(3)（降雨有り，透気・遮水シート）：(a)河川水位 150mm に達した時，(b) 河川水位 150mm を保持して 10 分経過した時，(c) 河川水位 250mm に達した時，(d)河川水位 250mm を保持して 10 分経過した時

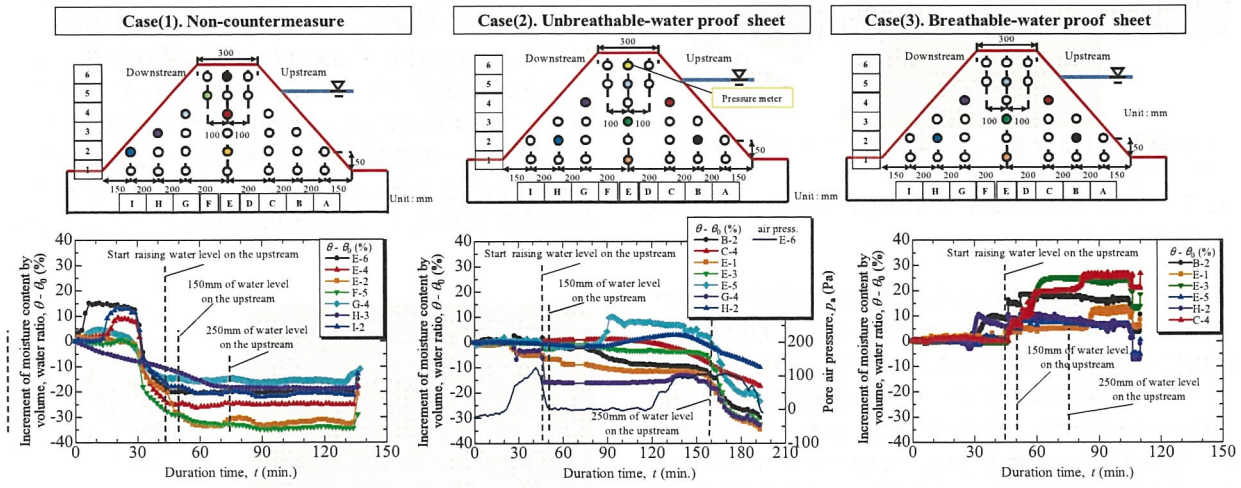
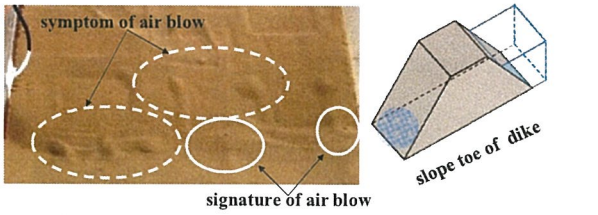


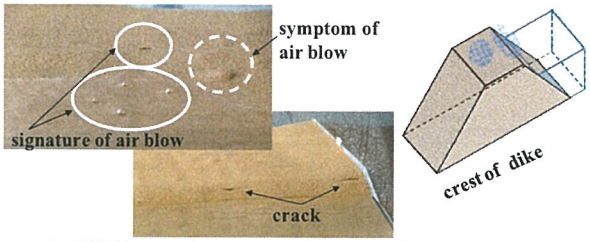
図-6　**堤体内の水分量変化**：Case(2)（降雨有り，不透気・遮水シート）ではシート下の間隙空気圧の変化を示す．

(1) 浸潤挙動に及ぼす降雨の影響

事前降雨と降雨を伴う Case(1)の場合，**図－5** (a)（河川水位 150mm に達した時）に示すように，堤体内部への浸潤速度が速く，堤内側法面下部で崩壊を始めているため，早期の決壊を招く恐れがあり危険である．一方，(b)（河川水位 150mm を保持して 10 分経過した時），(c)（河川水位 250mm に達した時）となると，堤外側水位が上昇するとともに堤内側の法面が浸食される．(d)（河川水位 250mm を保持して 10 分経過した時）では，堤体内が飽和し，河川の水面と同等の高さまで浸食が伝播し表層崩壊が進んでいる．ここで，**図－6** に示されている体積含水率の変化($\theta - \theta_0$) ($\theta = w\ (\rho_d/\rho_w) = eS_r / (1+e)$; w, ρ_d, ρ_w, e, S_r はそれぞれ含水比，土の乾燥密度，水の密度，間隙比，飽和度）を見てみる．実験開始後 30 分程度は，降雨によって堤体内の水分量が増加しているが，その後，降雨が継続しているにも関わらず体積含水率の値が低下し始め，湿潤していた基盤層と降雨の浸潤線に挟まれた領域では初期状態と同値を示している．さらに，45 分経過以降も河川水位を上昇したにも関わらず体積含水率は下がり，堤防の越流崩壊の約 135 分までの間，低い値が保持されている．雨による浸潤によって堤体内部に閉じ込められた空気塊に起因することが考えられる．



(a) 実験開始 75 分頃： 法先でのエアブローおよびその兆候としての表面の膨れ



(b) 実験開始 125 分頃： 天端でエアブローの発生およびクラックの発生

図-7 堤体の変状の様子： Case(1) （降雨有り，不透気・遮水シート）

実験中，堤防の表面からも，特徴的な現象を観察することができた．まず，75 分過ぎには側面から堤体内に空気塊が存在することができ，**図－7 (a)** に示すように法先にエアブローやその兆候としての表面の膨れが観察することができた．また，125 分頃には，**図－7 (b)** に示すように，天端でエアブローの発生を確認するとともに，上流側に引張り亀裂のような変状が見られた．以上のことから，降雨と河川水位上昇が生じると，浸潤線の進行によって空気塊が閉じ込められていくとともに，堤内側や天端の体積含水率が顕著に低い値をとることからも，閉じ込められた空気塊が圧縮されていることが分かる．この結果，地表面に押し出されることでエアブローが生じるとともに亀裂といった堤体に損傷を与えることが分かった．越流時には，閉じ込められた圧縮空気塊には揚力がかかることからも，堤体の破壊を助長することが想像できる．

(2) 浸潤挙動に及ぼすシート設置の影響

Case(2)（降雨有り，不透気・遮水シート）の場合，**図－5** の(a)では，Case(1) （降雨有り，シート無し）と比較して堤体内への浸潤は遅く，堤体内の浸潤線の発達が非常に複雑に進行している．そのため，(b)，(c)，(d)の段階では，大きな不飽和領域が形成されている．また，堤体の天端方向への浸潤が他のケースと比較して非常に遅いことから，シート内部に圧縮空気が封入され浸潤線の進行を妨げることが原因と考えられる．この場合，大規模なエアブローを引き起こす可能性がある．堤体内においては，実験開始直後は降雨によっても体積含水率はほとんど増加することがないが，20 分を経過すると，天端のシート下で計測している空気圧 p_a は上昇を始める．その後，体積含水率が低下する領域が表れ，空気圧は低下する．河川水位 150mm 以下では体積含水率に若干の変化はあるものの空気圧に変化は無い．河川水位が 250 mm に到達すると，体積含水率の低下と空気圧上昇が同時に進行していく．つまり，Case(2)では，大きな圧縮空気塊が出来ると伴に，外部の水位上昇によって空気圧が上昇することになる．越流時には，シートには大きな揚圧力が掛かることが考えられ，シートが剥がれる際には堤体に大きな損傷を与えることになることが想像される．

つぎに，Case(3)の場合（降雨有り，透気・遮水シート），Case(2)の不透気性遮水シートとは異なり，浸潤が水位上昇と伴に進んでいる．また，堤体内では実験開始 30 分経過後に堤体下部において体積含水率の増加が始まり，その後の河川水位上昇時においても，Case(1)や Case(2)のように顕著な低下を示すこと無く保持されている．また，**図－8** に示すように，75 分過ぎには，Case(1)のときと同様に法先にエアブローの兆候と考えられるような表面の膨れが観察されることから，シートの透気性によって堤体内の空気が抜け，浸潤線の進入を助けたことが分かる．

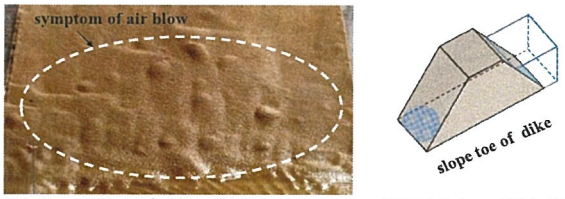


図-8 堤体の変状の様子： Case(3) （降雨有り，透気遮水シート）

Case(1)から Case(3)に対して，越流後の状態を**図ー9** に示す．Case(1)のようにシートが無い場合には，崩壊や洗掘が進み，堤体が破壊しているが，Case(2)や Case(3)のように，堤体全面にシートが敷設され，今回の実験の様にシートが剥がれないように工夫されている場合には，シートよりも下部の堤体が保護されていることがわかる．ただし，Case(2)のように不透気シートの場合には，内部に高い圧力を持った圧縮空気が存在し，必ずしもシートが側面に固定されないような実際の状態では，大規模なエアブローで堤体が決壊する可能性があることが考えられる．

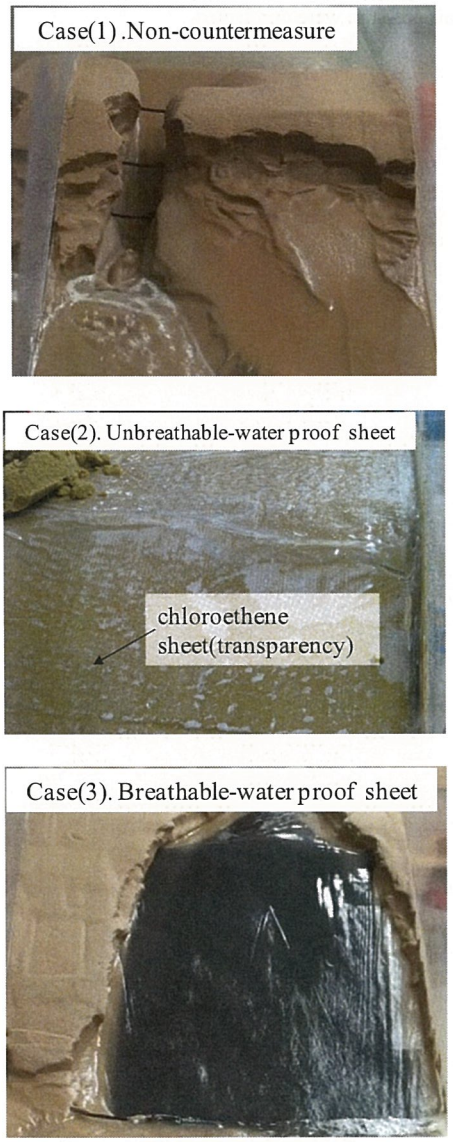


図-9　越流後の堤体の様子

4．結論

本研究では，降雨発生装置を備えた模型堤防実験により，降雨浸透や河川水位の上昇に伴う間隙空気塊の挙動を把握した．無対策の堤体では，降雨浸透や河川水位の上昇により空気圧の上昇やブロー現象が確認されるとともに，天端にクラックも生じ，堤体内の圧縮空気の封入によって堤体に損傷が生じることが模型実験でも確認することができた．
不透気性の遮水シートによる浸透防止対策工ではシート下位の間隙空気圧が上昇した．越流時にはこの間隙空気が堤防への突発的な損傷を与えることが予想される．また，透気性のある遮水シート施工時は，浸潤線の経時変化から堤体内部から外部への早期の気泡放出が確認され，降雨浸透防止効果と間隙空気圧の軽減効果が生じることが分かった．

参考文献

1) Maeda, K., Sakai, H. and Sakai, M.: Development of failure analysis method of ground with Smoothed Particle hydrodynamics. *JSCE, Journal of Struct. Eng. And Earthquake Eng.* Vol.23, No.2, pp.307-319, 2006.
2) Maeda, K. and Sakai, H.: Seepage failure and erosion of ground with air bubble dynamics, *ASCE, Geoenvironmental Engineering and Geotechnics*, GSP 204, pp. 261-266, 2010.
3) 中日新聞社 (2000)：中日新聞朝刊2000年9月15日朝刊.
4) 小高猛司，浅岡顕：砂質地盤での浸透過程での気泡の発生・発達現象，土木学会論文集，487/III-26，pp. 129-138，1994.
5) 中島保治：干拓堤防のパイピングについて，土と基礎，地盤工学会，Vol. 13，No. 2，pp. 83-88，1985.
6) 上田滋夫，桝尾孝之：河川堤防に用いる新しいジオシンセティックスの提案，地下水地盤環境に関するシンポジウム論文集 ー 水辺と堤防と地下水 ー，2006.
7) 桝尾孝之，三吉正英，椋木俊文，谷口徳晃：通気・防水シートを用いた河川堤防の強化に関する基礎的実験，土木学会第62回年次学術講演会講演概要集，第Ⅱ部門，pp.229-230，2007.
桝尾孝之，石田正利，山本正人：ジオシンセティックス（透気・遮水シート）の透気性能に関する基礎的実験，土木学会第64回年次学術講演会講演概要集，第Ⅴ部，pp.673-674，2009.

LAYING EFFECT OF BREATHABLE – WATER PROOF SHEET ON RIVER DIKE CONSIDERING HEAVY RAIN AND AIR BUBBLE

Kenichi MAEDA, Satoshi SHIBATA, Kanji BABA, Takayuki MASUO and Tatsuya IMASE

Based upon numerical analysis, the damage of a river dike caused by a localized torrential downpour is presumed to be related to the saturation of the dike, due to seepage water from the dike surface and blow off of pore air (air blow) following a rise in the seepage line in the dike. Since a river dike located at the downstream, where urbanization has been in progress, is composed of sandy soil consisting mainly of soft and fine particles, the river dike is considered to be easily damaged by pore air that has been enclosed within the dike body. In this study, by performing experiments using a dike model equipped with a rainfall generation apparatus, the behavior of a pore air mass captured by rainfall seepage and a rise in the river water level was investigated. When no counter-measures had been taken to the dike, a rise in the pore air pressure and an air blow phenomenon were confirmed following rainfall seepage and a rise in the river water level. When seepage prevention measures using an unbreathable - waterproof sheet had been taken, the pore air pressure below the sheet rose. When seepage prevention measures using a breathable - waterproof sheet had been taken, the effect of preventing rainfall seepage and that of reducing the pore air pressure were confirmed.

浸食・浸透破壊・洗掘の解析法に関する考察

150108 内田龍彦

解析が可能かどうかについて水工学の視点から力学モデルで計算できるかどうか考察してみた．ただし，レビュー，考察は十分でなく，たたき台的なものである．

１．越流流れ＋浸食系＋（浸透）：
二次元系：実物大レベル～実験室(鉛直二次元構造に着目できないという意味で)
三次元系：(計算負荷の面で．ただし時間の問題)実験室～＞＞土粒子(空間平均されたモデルという意味で)

越流侵食（鉛直二次元，三次元侵食）二次元計算で三次元形状，鉛直二次元系解析で二次元形状がふつう．鉛直二次元解析であれば，浸透流との一体解析が多い．三次元解析は未だほとんど見られないが，そのような研究が行われるのも時間の問題であり，現象が解析できるかどうかとレベルでは大きな問題はないように思われる．妥当性，信頼度に関する大きな課題としては，土砂が激しく移動する場合の流れ-土砂移動の相互作用が多くの場合考慮されていないことである．土砂移動が無い場合でも，厳密に言うと流れの式はダブルアベレージングされたものであり，レイノルズ平均に関しては空隙内と越流部での Re 数の急変が考慮できるかどうかや，空間平均の応力部分をきちんと評価する手法が課題である．

参考文献

1) 辻本哲郎，鷲見哲也，寺本敦子，前田 和:破堤拡大過程と河川特性の関係について，河川技術論文集，第 11 巻, pp.121-126, 2005.
2) 内田龍彦，福岡捷二：構造物を越流する流れの解析法の開発，河川技術論文集，第 18 巻，pp.351-356，2012.
3) 音田慎一郎，細田 尚，JACIMOVIC Nenad，木村一郎：正面越流による堤防侵食過程の数値シミュレーション，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.69, No.4, I_1207-I_1212, 2013.

２．浸食流＋浸透侵食：
三次元系：実験室～≒土粒子 （取り扱わないといけないという意味で．現時点で可能かどうかは勉強不足）

流れ DNS，粒子レベルの個別要素法を用いれば原理的には解けそう．しかし，粒子が小さくなっていくほど非現実的で，シルト～実堤防というスケールの解析は，流れ系，粒子径ともに計算負荷が莫大となり，将来的にもちょっと絶望的か．流れ系の定式化は上述のダブルアベレージの問題．粒子径は個別要素法を用いつつ，空間平均されたような，流れの粒子法的な発想が必要であろう．また，シルトなどの小さい粒子は流体の応力として分離しないことも考えられるのではないか．同様の課題は，激しい局所洗掘の表面付近や圧力変動が伴う流れによる局所洗掘や河岸侵食にも関係する大事なテーマであるが，まだまじめに力学モデルに基づいて解くのは早いのか？

植生：上がモデル化されないといけないだろう．土粒子レベルともいえるか．土の引張強度増加ならやられているが．

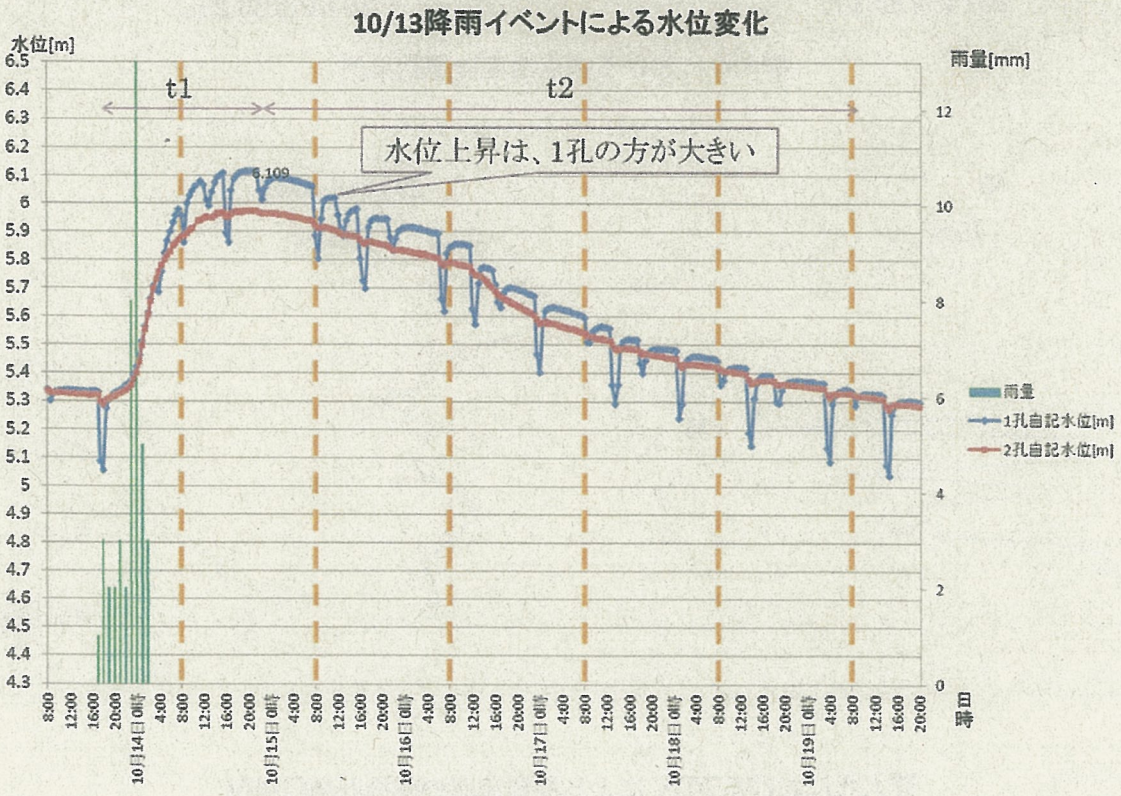
堤防連携 WG 第 8 回合同会議資料

◆「調査」の中～長期

基盤の透水性に関する連続観測

群大孔約 20m 離れた 2 孔間の水位応答性(≒地盤の透水性)の大きな差異について，ポンプ要因であるとすると?

群馬大学伏流水観測孔位置図



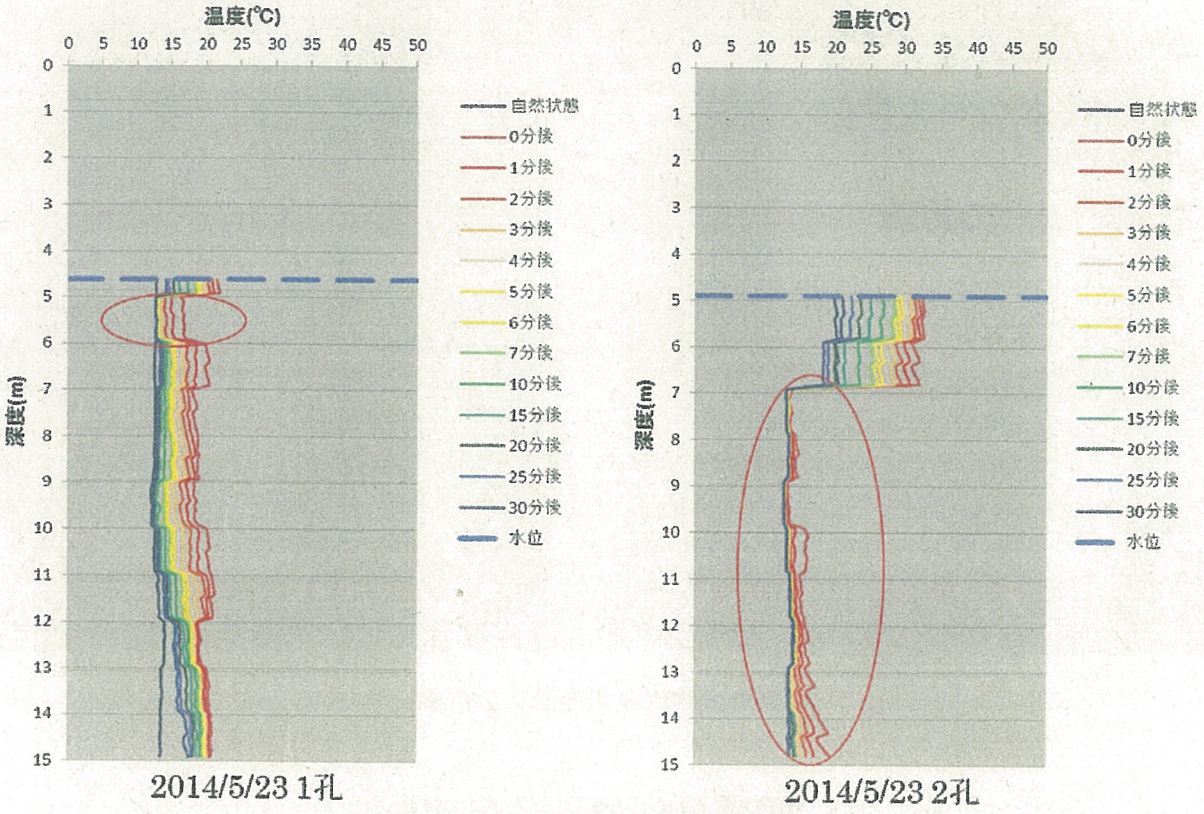
群馬大学伏流水観測孔水位計測結果例

堤防連携 WG 第 8 回合同会議資料

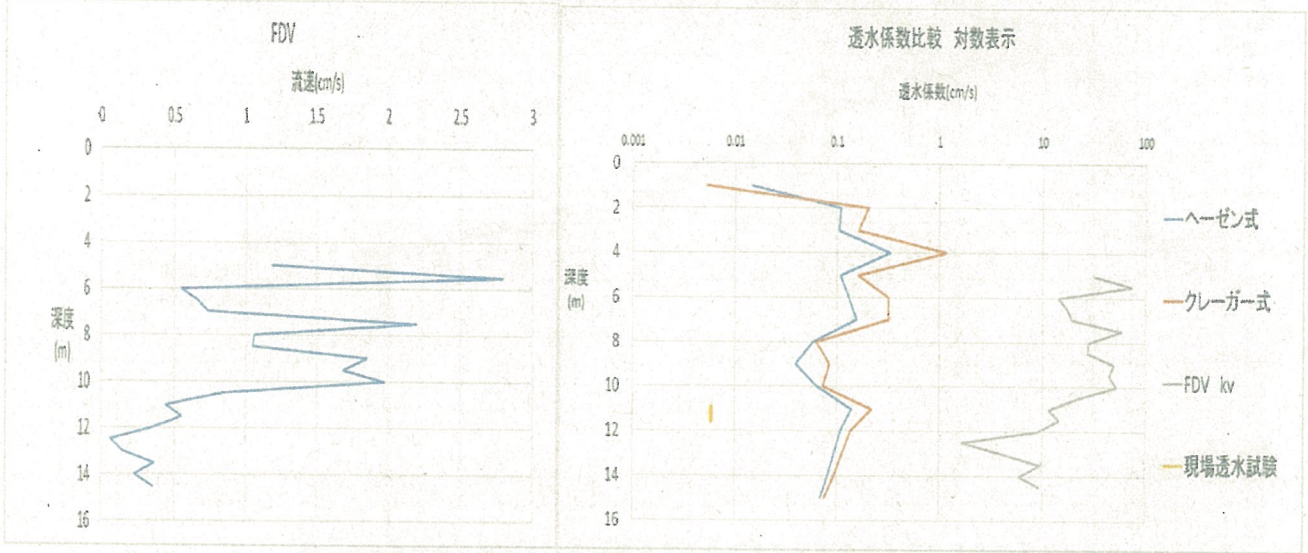
◆「調査」or「評価」の中～長期

浸透流速の直接観測による地盤透水性の評価

1孔&2孔の多点温度検層結果



群大孔における多点温度検層結果例



群大孔における FDV による浸透流速の直接計測結果例

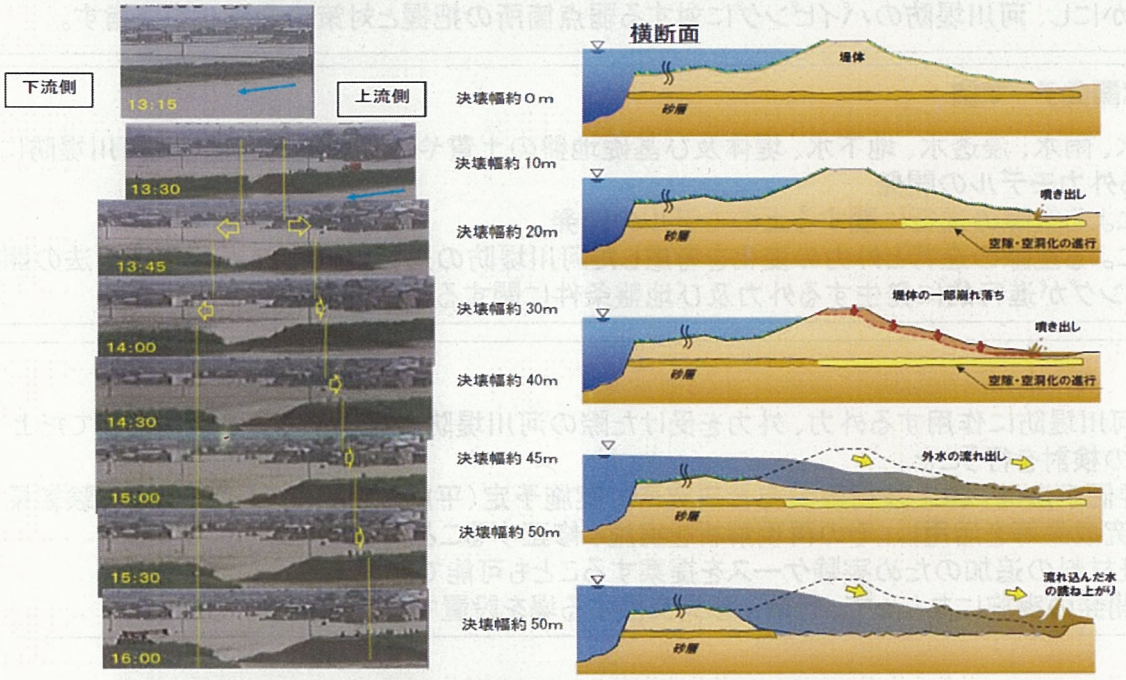
河川技術分野　平成27年度新規公募課題
透水性基礎地盤に起因する河川堤防の変形に関する技術研究開発

◆背景

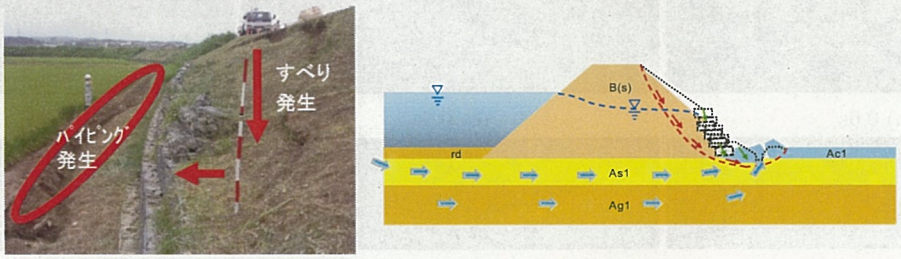
近年、パイピングやそれに伴う堤体のすべり等の発生により、河川堤防の決壊や変形が生じる被災が発生している。現状では、飽和不飽和浸透流解析を用いて、パイピングの発生の有無を評価している。

しかし、堤防決壊に至るような大規模かつ進行的なパイピングの発生とそれに伴う河川堤防の変形について、再現し評価できる解析技術は存在しない。

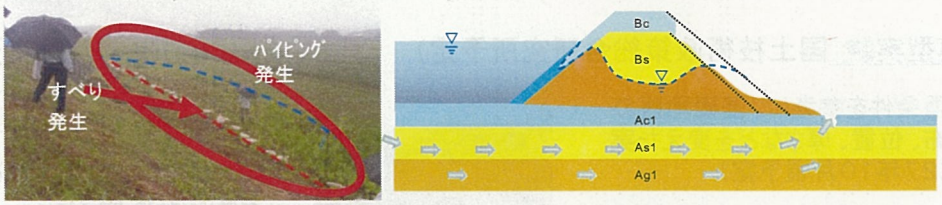
そのため、補強の緊急性の高い弱点箇所の評価ができず、安全度の向上のネックとなっている。



矢部川の堤防被災と被災メカニズム（想定）



梯川の堤防被災と被災メカニズム（想定）



子吉川の堤防被災と被災メカニズム（想定）

◆技術研究開発期間、費用負担限度額

最長3年で合計3,500万円まで

◆技術研究開発の内容

国土技術政策総合研究所で実施予定の大型模型実験結果等をもとに以下の研究開発を行う。（なお、テーマ例に示すように下記の内容を必ずしも全て網羅する必要は無く、一部でもよい。）

① 周辺地形、河道状況、堤体及び基礎地盤の土質や土層構造を考慮し、河川水、雨水、浸透水、地下水等により河川堤防に加わる外力（静水圧、動水圧）を精度良く推定する技術の開発

② ①の外力による噴砂の発生、空洞化の進行、それに伴う堤体のすべり等の一連の河川堤防の変形モードとその経時的な変形状況を再現する技術の開発

③ ①②をもとに堤防決壊に至る可能性を評価する手法の開発

④ ①～③のいずれかの実現に資する、基礎的な実験及び現地調査の実施

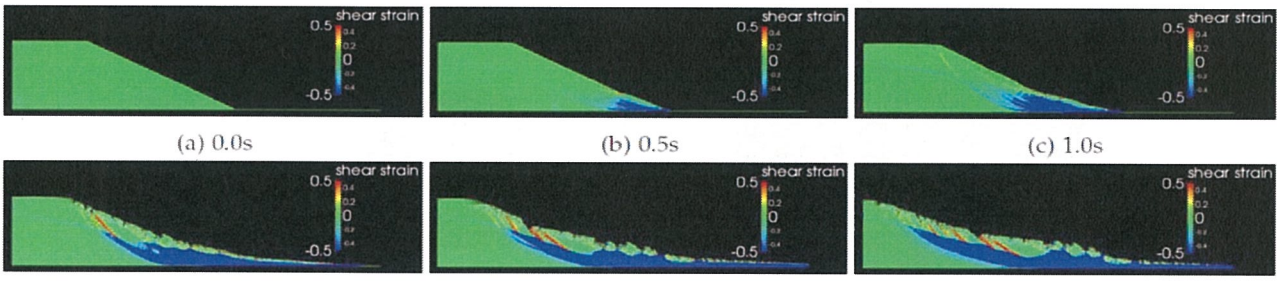
その結果をもとに、進行的なパイピングの発生による堤防決壊の危険性の高い外力、地盤条件及び変状を明らかにし、河川堤防のパイピングに対する弱点箇所の把握と対策の合理化を目指す。

◆技術研究開発テーマ例

① 河川水、雨水、浸透水、地下水、堤体及び基礎地盤の土質や土層構造を考慮した河川堤防に加わる外力モデルの開発
② 噴砂による空隙の進行に関する土のモデルの開発
③ 噴砂による空隙の進行と外力の変化を考慮した河川堤防の進行性破壊の再現解析手法の開発
④ パイピングが進行的に発生する外力及び地盤条件に関する基礎的実験

◆条件等

・出水時に河川堤防に作用する外力、外力を受けた際の河川堤防の挙動について仮説を立てた上で、評価手法の検討を行うこと。
・検討した評価手法は、国土技術政策総合研究所で実施予定（平成27年10月頃）である実験結果や既往の研究成果等を活用し、その再現解析を実施し修正すること。
なお、検証材料の追加のため実験ケースを提案することも可能である。
・技術研究開発の実施にあたって、行政と意見交換する場を設置するので参加すること。



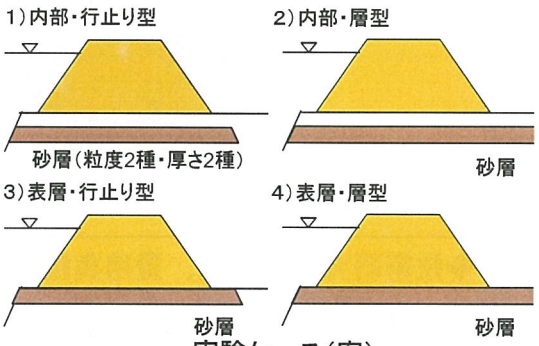
開発する解析のイメージ（堤防の進行性破壊（すべり））

実大規模の模型実験（国土技術政策総合研究所予定）

矢部川等の地盤条件を参考に、基礎地盤の砂層の粒度分布、位置、厚さなどを変えた実験を実施（平成27年10月頃予定）

・透水性基礎地盤に作用する水圧分布の把握
・透水性基礎地盤の噴砂の進行状況の把握
・堤体及び基礎地盤の進行性破壊の状況の把握

実験イメージ



実験ケース（案）

1　決壊に至るメカニズム解明

1) 李圭太，小山倫史，大西有三，古川秀明，小林猛嗣．越流を考慮した河川堤防の浸透破壊に対する応力－浸透連成解析．地盤工学ジャーナル，Vol.4,No. 1, pp.1-9, 2008.
2) 小高猛司，板橋一雄，中島康介，牧田祐輝，李圭太，上村俊英，坪田邦治，加藤雅也．河川堤防砂礫の変形・強度特性の評価手法に関する考察．地盤工学ジャーナル，Vol.5,No. 2, pp.193-2005, 2010
3) 小高猛司，崔瑛，中村太意，李圭太，榎本文勇．堤体内樋門周辺のゆるみ領域の生成・発達に関する模型実験．地盤工学研究発表会，48th, pp.1175-1176, 2013
4) 原忠，畑山諒人，李圭太，岡嶋義行，岡林福好．礫質土の液状化強度と液状化後の変形性．地盤工学研究発表会，48th, pp.595-596, 2013
5) 小高猛司，崔瑛，小林芳樹，兼松祐志，森涼香，李圭太，坪田邦治，加藤雅也．液状化が懸念される堤防基礎礫質土の大型三軸試験．地盤工学研究発表会，48th, pp.587-588, 2013
6) 小高猛司，崔瑛，兼松祐志，森涼香，小林芳樹，李圭太．各種三軸試験条件で得られる河川堤防土の強度定数の評価．地盤工学研究発表会，48th, pp.565-566, 2013
7) 小高猛司，崔瑛，森涼香，兼松祐志，李圭太．構造の異なる礫混じり砂再構成供試体の三軸試験シミュレーション．地盤工学研究発表会，47th, pp.343-344, 2012
8) 小高猛司，崔瑛，兼松祐志，森涼香，李圭太．供試体再構成時の含水比の違いによる礫混じり砂の変形・強度特性の変化．地盤工学研究発表会，47th, pp.341-342, 2012
9) 小高猛司，板橋一雄，森涼香，牧田祐輝，李圭太，上村俊英．供試体作成法の違いが礫混じり砂の単調ならびに繰り返しせん断挙動に及ぼす影響．地盤工学研究発表会，46th, pp.393-394, 2011
10) 李圭太，小山倫史，長野航平，秋場俊一，大西有三．豪雨時における不飽和特性に着目した斜面の浸透特性に関する解析的研究．地盤工学研究発表会，44th, pp.1479-1480, 2009
11) 小林猛嗣，小山倫史，長野航平，李圭太，大西有三．斜面勾配が豪雨時の雨水浸透特性に与える影響に関する一考察．地盤工学研究発表会，44th, pp.1467-1468, 2009
12) 李圭太，中上宗之，大橋泰博，大賀祥一，大田学．江の川上流における地形・地質的特徴と河川堤防の耐浸透特性に関する考察．地盤工学研究発表会，43th, pp.1121-1122, 2008
13) 李圭太，中上宗之，古屋隆男，竹崎伸司，江川祐輔．高津川における地形・地質的特徴と河川堤防の耐浸透特性に関する考察．地盤工学研究発表会，43th, pp.1119-1120, 2008
14) 小林猛嗣，荒井克彦，大西有三，竹内成和，細川仁志，李圭太．福井豪雨における破堤要因に関する考察．地盤工学研究発表会，40th, pp.2153-2154, 2005
15) 李圭太，荒井克彦，大西有三，竹内成和，三田村佳紀，小林猛嗣．福井豪雨における河川堤防の浸透に関する考察．地盤工学研究発表会，40th, pp.2149-2150, 2005
16) 小高猛司，野田利弘，吉川高広，高稲敏浩，李　圭太，崔　瑛，粘土基礎地盤上の河川：堤防の被災メカニズムに関する一考察，地盤工学会特別シンポジウム-東日本大震災を乗り越えて-」，2013.
17) 大野雄貴，小高猛司，　崔瑛，吉田賢史：東日本大震災で被災した河川堤防の基礎地盤粘性土の圧縮およびせん断特性，平成 25 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，CD-ROM, 2014. 3.
18) 小高猛司，崔瑛，大野雄貴，吉田賢史：異方応力条件下の粘土の繰返し載荷時の即時変形とその後の圧密変形第 48 回地盤工学会研究発表会講演集，CD-ROM, 2013.7.
19) 大野雄貴，小高猛司，崔瑛，吉田賢史：異方応力条件下の粘土のひずみ制御繰返し単純せん断試験，第 68 回土木学会年次学術講演会 CD-ROM, 2013.8.
20) 吉田賢史，小高猛司，三好直輔，崔瑛：不攪乱自然堆積粘土の繰返し単純せん断後の変形について，第 47 回地盤工学会研究発表会講演集，CD-ROM, pp.315-316, 2012.7.
21) 吉田賢史，小高猛司，崔瑛，三好直輔：繰返し単純せん断試験による自然堆積粘土の地震時ならびに地震後挙動の一考察，第 67 回年次土木学会学術講演会講演概要集，Ⅲ-259, pp.517-518, 2012. 9.
22) 大野雄貴，吉田賢史，小高猛司，崔瑛：自然堆積粘土のひずみ制御繰返し単純せん断試験，平成 24

年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，Ⅲ-022, pp.207-208, 2013. 3.
23) 小高猛司，崔瑛，小林芳樹，兼松祐志，李圭太:河川堤防砂の構造の程度が力学特性の評価に及ぼす影響，河川技術論文集 19, pp. 165-177, 2013.
24) 大野雄貴，小高猛司，崔瑛，吉田賢史:異方応力条件下の粘土のひずみ制御繰返し単純せん断試験，第 68 回土木学会年次学術講演会 CD-ROM, 2013.8.
25) 兼松祐志，小林芳樹，小高猛司，崔瑛，李圭太:細粒分を多く含む堤防砂質土の三軸試験のシミュレーション，第 68 回土木学会年次学術講演会 CD-ROM, 2013.8.
26) 小林芳樹，兼松祐志，小高猛司，崔瑛，李圭太:細粒分を多く含む堤体砂質土の各種三軸試験による力学特性の評価，第 68 回土木学会年次学術講演会 CD-ROM, 2013.8.
27) T. Kodaka, Y. Cui, S. Mori and Y. Kanematsu: Soil structure in gravel-mixed sand specimen and its influence on mechanical behavior, Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris, 2013.
28) 兼松祐志，森涼香，小高猛司，崔瑛，李圭太:初期含水比の違いが河川堤防砂の力学特性に及ぼす影響とその三軸試験シミュレーション，第 24 回中部地盤工学シンポジウム論文集，2012.8.
29) 兼松祐志，小高猛司，崔瑛，森涼香，李圭太:供試体再構成時の含水比の違いによる礫混じり砂の変形，強度特性の変化，第 47 回地盤工学会研究発表会講演集，CD-ROM, pp.341-342, 2012.7.
30) 森涼香，小高猛司，崔瑛，兼松祐志，李圭太:構造の異なる礫混じり砂再構成供試体の三軸試験シミュレーション，第 47 回地盤工学会研究発表会講演集，CD-ROM, pp.343-344, 2012.7.
31) 森涼香，兼松祐志，小高猛司，崔瑛，李圭太:再構成供試体の骨格構造が力学挙動に及ぼす影響の三軸シミュレーションによる検討，第 67 回年次土木学会学術講演会講演概要集，Ⅲ-366, pp.731-732, 2012. 9.
32) 大野雄貴，小高猛司，崔 瑛，李 圭太:庄内川堤防基礎地盤粘性土のサンプリングと変形・強度特性，土木学会第 69 回年次学術講演会，大阪，Ⅲ, pp.83-84, 2014.9.
33) 吉川高広，野田利弘，小高猛司，崔 瑛:不飽和浸透模型実験の空気～水～土骨格連成有限変形シミュレーション，土木学会第 69 回年次学術講演会，大阪，Ⅲ, pp.297-298, 2014.9.
34) 崔 瑛，小高猛司，李 圭太，榎本文勇，中村太意，武 楊:樋門周辺の空洞とゆるみ領域の生成・発達に関する三次元模型実験，土木学会第 69 回年次学術講演会，大阪，Ⅲ, pp.299-300, 2014.9.
35) 崔 瑛，小高猛司，李 圭太，榎本文勇，中村太意，武 楊:樋門周辺の空洞とゆるみ領域の生成・発達に関する模型実験，第 49 回地盤工学研究発表会講演概要集，北九州，pp.907-908, 2014.7.
36) 吉川高広，野田利弘，小高猛司，高稲敏浩:粘土地盤上の不飽和盛土で地震後に生じる水位上昇・下降現象の空気～水～土連成解析，第 49 回地盤工学研究発表会講演概要集，北九州，pp.1389-1390, 2014.7.
37) T. Kodaka, T. Noda, T. Yoshikawa and T. Takeine: Seismic and Postseismic Behavior of River Levee on Soft Clay Ground, Keynote Lecture, MS22, The 1st International Conference on Computational Engineering and Science for Safety and Environmental Problems, COMPSAFE 2014, Sendai, pp.138-139, 2014.4.

2 危険箇所把握のための調査

1) 富澤彰仁，吉川智勝，小林猛嗣，李圭太，小山倫史，大西有三．河川堤防における締め固めた地盤の透水試験の適用に関する考察．地盤工学研究発表会，46th, pp.1087-1088, 2011
2) 李圭太，小林猛嗣，向井信之，宗之正則，大西有三．不飽和地盤における現場透水試験に関する考察．地盤工学研究発表会，41th, pp.101-102, 2006
3) 嶋岡崇，荒井克彦，松井保，高鳥佐太一，三田村佳紀，李圭太．福井豪雨における破堤に着目した地盤調査に関する考察．地盤工学研究発表会，40th, pp.2151-2152, 2005

4) 小林芳樹，兼松祐志，小高猛司，崔瑛石原 雅規原 忠李 圭太，ボーリング試料による礫地盤の粒度評価と液状化対象土層の判定に関する考察，平成 25 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，CD-ROM, 2014. 3.
5) 石原雅規，小高猛司，原忠，李圭太:礫質土の粒度評価におけるボーリング調査径に関する研究，2013.
6) 小林芳樹，兼松祐志，小高猛司，崔瑛石原 雅規原 忠李 圭太，ボーリング試料による礫地盤の粒度評価と液状化対象土層の判定に関する考察，平成 25 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，CD-ROM, 2014. 3.

3 決壊可能性把握のための評価

1) 李圭太，小山倫史，大西有三，古川秀明，小林猛嗣．越流を考慮した河川堤防の浸透破壊に対する応力－浸透連成解析．地盤工学ジャーナル，Vol.4,No. 1, pp.1-9, 2008.
2) 小高猛司，板橋一雄，中島康介，牧田祐輝，李圭太，上村俊英，坪田邦治，加藤雅也．河川堤防砂礫の変形・強度特性の評価手法に関する考察．地盤工学ジャーナル，Vol.5,No. 2, pp.193-2005, 2010
3) 富澤彰仁，李圭太，吉川智勝，小山倫史，大西有三．飽和－不飽和浸透流解析における地盤特性の設定に関する一考察．地盤工学研究発表会，48th, pp.1071-1072, 2013
4) 小高猛司，崔瑛，兼松祐志，森涼香，小林芳樹，李圭太．各種三軸試験条件で得られる河川堤防土の強度定数の評価．地盤工学研究発表会，48th, pp.565-566, 2013
5) 竹中宏，李圭太，小山倫史，上山高史，吉川智勝，大西有三．河川堤防における礫質盛土を対象とした透水性に関する一考察．地盤工学研究発表会，47th, pp.943-944, 2012
6) 秋場俊一，李圭太，小山倫史，大西有三，岡嶋義行，北川誠純，有田由高．河川堤防の耐震性能照査における砂礫地盤の液状化挙動に関する一考察．地盤工学研究発表会，46th, pp.1063-1064, 2011
7) 小高猛司，板橋一雄，牧田祐輝，中島康介，李圭太，上村俊英，坪田邦治，加藤雅也．河川堤防砂礫のせん断強度特性に及ぼす供試体寸法・密度・排水条件の影響．地盤工学研究発表会，45th, pp.257-258, 2010
8) 小高猛司，板橋一雄，中島康介，岸賢吾，李圭太，坪田邦治，加藤雅也．大型三軸試験による河川堤防土の力学特性の評価．地盤工学研究発表会，44th, pp.371-372, 2009
9) 李圭太，小林猛嗣，大西有三，小山倫史，秋場俊一．河川堤防の浸透挙動解析における不飽和特性に関する考察．地盤工学研究発表会，43th, pp.1127-1128, 2008
10) 小高猛司，板橋一雄，李圭太，中島康介，岸賢吾，天野留美，坪田邦治，加藤雅也．三軸試験による河川堤防礫混じり砂の強度評価．地盤工学研究発表会，43th, pp.373-374, 2008
11) 小高猛司，板橋一雄，李圭太，岸賢吾，中島康介，天野留美，坪田邦治，加藤雅也．河川堤防礫混じり砂の大型三軸試験．地盤工学研究発表会，43th, pp.371-372, 2008
12) 小高猛司，板橋一雄，坂井田旭秀，岸賢吾，李圭太．三軸試験による礫混じり砂の強度評価における最大粒径と供試体寸法の影響．地盤工学研究発表会，42th, pp.335-336, 2007
13) 小高猛司，板橋一雄，岸賢吾，坂井田旭秀，李圭太．三軸試験におけるシルト質砂の強度評価における載荷速度の影響．地盤工学研究発表会，42th, pp.333-334, 2007
14) 李圭太，上山高史，中上宗之，天野順次，大西有三．河川堤防を対象とした浸透流解析における基礎地盤のモデル化に関する考察．地盤工学研究発表会，41th, pp.1213-1214, 2006
15) 李圭太，黒田兆次，大橋泰博，岩本和也，大西有三．中間土を対象とした三軸圧縮試験における載荷速度に関する考察．地盤工学研究発表会，41th, pp.333-334, 2006
16) 大西有三，大津宏康，李圭太，黒田兆次，小林猛嗣．河川堤防を対象とした浸透流解析における降雨境界の設定に関する考察．地盤工学研究発表会，36th, pp.XX-XX, 2001
17) 大西有三，大津宏康，石川浩，李圭太，小林猛嗣．河川堤防を対象とした浸透流解析における不飽和

特性の設定に関する考察. 地盤工学研究発表会, 35th, pp.XX-XX, 2000
18) 李圭太, 日宇洋平, 小林猛嗣, 小山倫史, 大西有三. 河川堤防を対象とした飽和－不飽和浸透流解析における初期飽和度に関する一考察. 土木学会年次学術講演会, 64th, pp.591-592, 2009
19) 兼松祐志, 森 涼香, 小林芳樹, 間宮健太, 小高猛司, 崔瑛, 李圭太:河川堤防土の力学特性の評価する上での排水条件の検討, 平成 24 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, Ⅲ-031, pp.225-226, 2013. 3.
20) 小高猛司, 崔瑛, 李 圭太, 兼松祐志, 小林芳樹:三軸試験の試験条件が河川堤防土の強度定数に及ぼす影響河川技術論文集(査読有), 第 19 巻, pp.81-87, 2013.
21) 小高猛司, 李圭太, 崔瑛, 兼松祐志, 小林芳樹:砂質堤体土の強度定数評価のための三軸試験条件の考察, 地盤工学から見た堤防技術シンポジウム, 2013.
22) 小高猛司, 崔瑛小林芳樹, 兼松祐志, 森涼香, 李圭太, 坪田邦治, 加藤雅也:液状化が懸念される堤防基礎礫質土の大型三軸試験, 第 48 回地盤工学会研究発表会講演集, CD-ROM, 2013.7.
23) 小高猛司, 崔瑛, 兼松祐志, 森涼香, 小林芳樹, 李圭太:各種三軸試験条件で得られる河川堤防土の強度定数の評価, 第 48 回地盤工学会研究発表会講演集, CD-ROM, 2013.7.
24) 小高猛司, 崔瑛, 李 圭太, 他 2 名:河川堤防土の強度定数決定のための試験条件についての一考察, 第 25 回中部地盤工学シンポジウム論文集(査読有), pp. 55-60, 2013.
25) 小林芳樹, 間宮健太, 森涼香, 兼松祐志, 小高猛司, 崔瑛, 李圭太, 坪田邦治, 加藤雅也:非排水および排水せん断時のゆる詰め砂礫地盤の力学挙動に関する考察, 平成 24 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, Ⅲ-020, pp.203-204, 2013. 3.
26) 兼松祐志, 森 涼香, 小林芳樹, 間宮健太, 小高猛司, 崔瑛, 李圭太:河川堤防土の力学特性の評価する上での排水条件の検討, 平成 24 年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集, Ⅲ-031, pp.225-226, 2013. 3.
27) 小林芳樹, 武 楊, 小高猛司, 崔 瑛, 李 圭太:堤防開削時に現地採取した乱れの少ない河川堤防砂の三軸試験, 土木学会第 69 回年次学術講演会, 大阪, Ⅲ, pp.321-322, 2014.9.
28) 小高猛司, 崔 瑛, 大野雄貴:河川堤防基礎地盤粘性土の力学特性, 第 49 回地盤工学研究発表会講演概要集, 北九州, pp.287-288, 2014.7.
29) 小高猛司, 崔 瑛, 小林芳樹, 兼松祐志, 李 圭太:河川堤防の安定性照査に用いるべき強度定数を求めるための三軸試験条件, 第 49 回地盤工学研究発表会講演概要集, 北九州, pp.947-948, 2014.7.
30) 平松佑一, 本城勇介, 大竹 雄, 李 圭太, 小高猛司:河川堤防の浸透安定性評価のための応答曲面導出に関する基礎的研究, 第 49 回地盤工学研究発表会講演概要集, 北九州, pp.1723-1724, 2014.7.

4 堤防決壊抑制のための対策

1) 江川祐輔, 李圭太, 多田羅謙治, 小山倫史, 大西有三. 河川堤防におけるウェルドレーン工法を用いた盤ぶくれ対策に関する検討. 地盤工学研究発表会, 48th, pp.1183-1184, 2013
2) 富澤彰仁, 李圭太, 高橋弘, 北川誠純, 小山倫史, 大西有三. 河川堤防の浸透対策工におけるウェルドレーン工法の適用性に関する一考察. 地盤工学研究発表会, 45th, pp.969-970, 2010

5 機能確保のための維持管理

1) 李圭太, 黒田兆次, 小林猛嗣, 大橋泰博. 河川堤防のモニタリングシステムに関する考察. 地盤工学研究発表会, 40th, pp.127-128, 2005

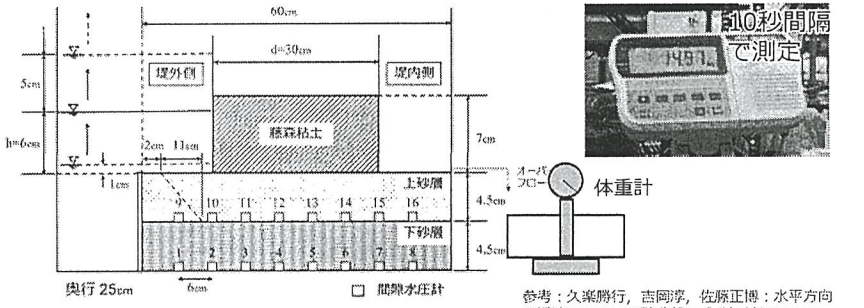
『piping侵食速度』を用いた外力波形に応じた危険度評価破壊抑制の設計

- 基盤の層構成流速，contact erosionにおける境界面の挙動
- 間隙水流れの流速と空洞内の水の流速，土砂濃度と土砂の移動量
- オーバーロードへの応答

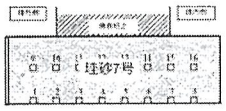
地盤特性と外力を一体に考える

均質な透水性基盤	堤体の粘着力　小	法尻の水圧上昇による支持力低下，すべり	高水の継は必要ない？
			高水の継続時間短
	堤体の粘着力　大	法尻の水圧上昇による支持力低下，すべり	高水の継続時間中？
不均質な透水性基盤	堤体の粘着力　小	ずるずるとすべり空洞の閉塞	高水の継続時間が必要　中？
	堤体の粘着力　大	断続的な崩落空洞化しやすい？基盤層の大きな侵食？	高水の継続時間が長く必要？

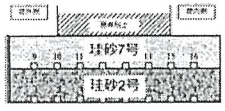
透水性基礎地盤のcontact erosion



参考：久楽勝行，吉岡淳，佐藤正博：水平方向浸透流下における砂地盤のﾊﾟｲﾋﾟﾝｸﾞについて，第20回土質工学研究発表会,pp.1483-1484, 1985.



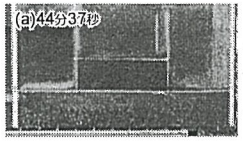
(a) case1



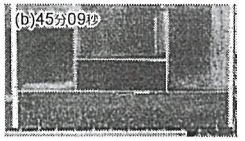
(b) case2

(c) case3

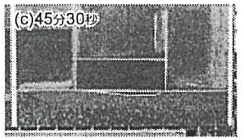
パイピングの様子，断面写真



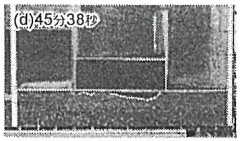
堤内側法尻付近から堤体土の流出が活発化し小さな空洞を確認．



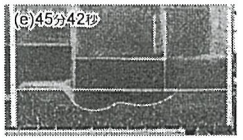
法尻付近の空洞が堤外側に伝播．（堤体部の変形や土砂供給・流失のバランスによって空洞が閉塞）



中央付近の空洞が堤内側へ掘進する．堤体土が空洞に沈下．（空洞に周りからの流入→流量の増加）



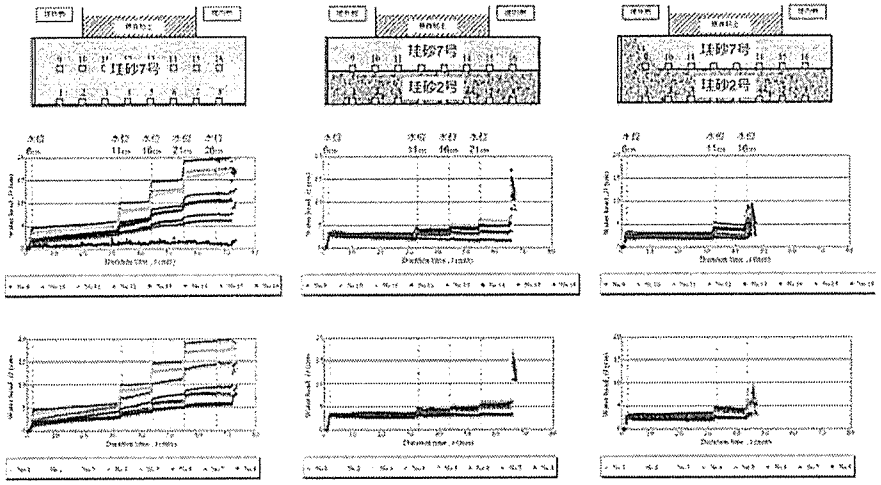
堤外側法先が陥没．河川水が上の砂層を勢いよく押し流す．（流速はダルシー則ではない）



パイピング孔が堤内側とつながる．

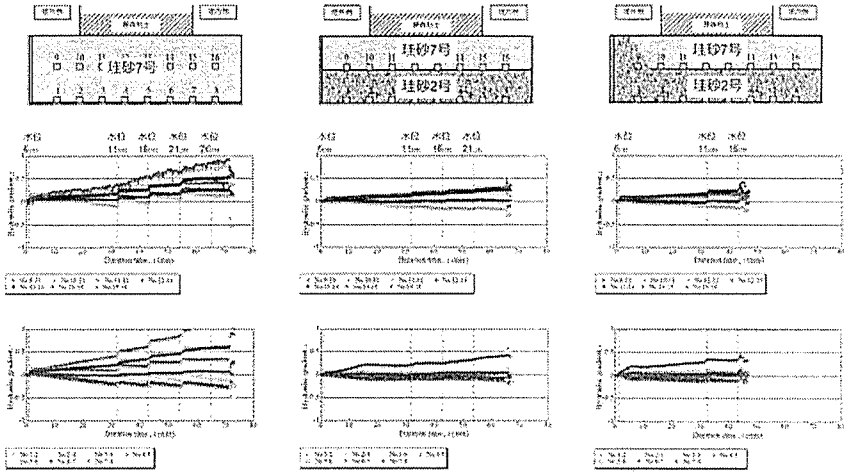
(b) case3

間隙水圧



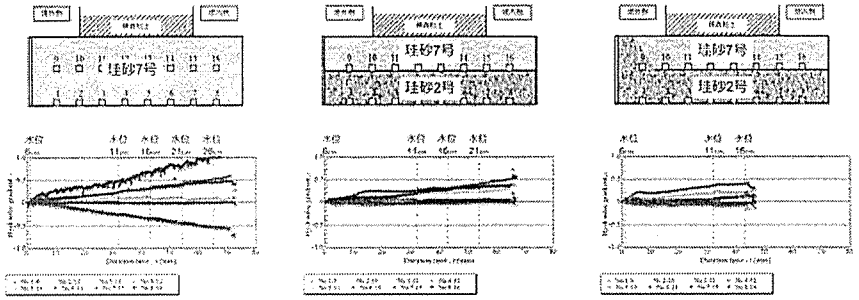
(a) case1　(b) case2　(c) case3

水平動水勾配（水平右向き正）



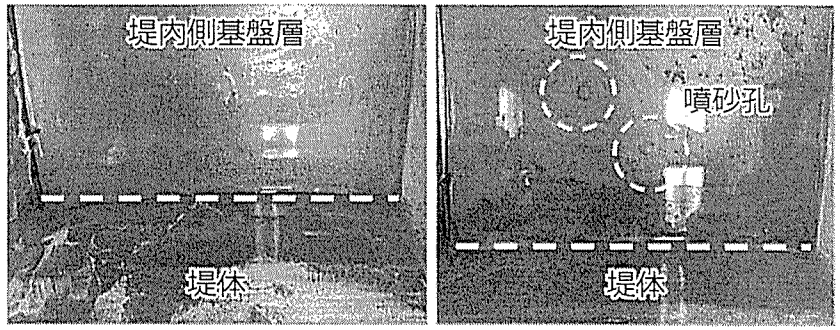
(a) case1　(b) case2　(c) case3

鉛直動水勾配（鉛直上向き正）



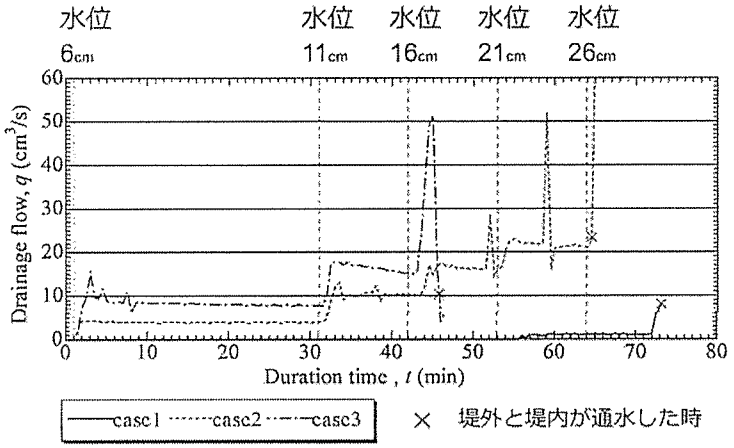
(a) case1　(b) case2　(c) case3

堤内側法尻における漏水の様子

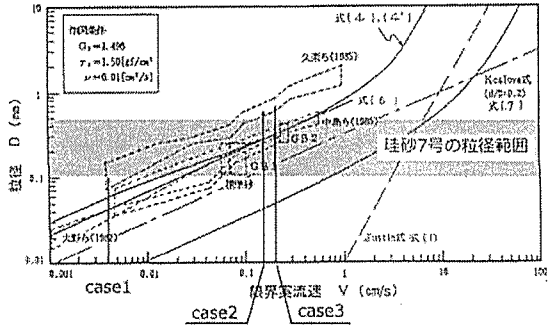


case1　case3

排水流量挙動の比較

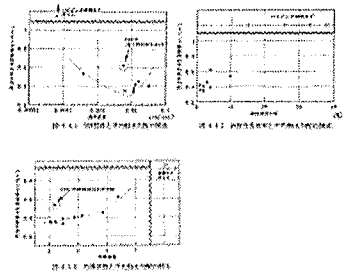


限界流速との比較

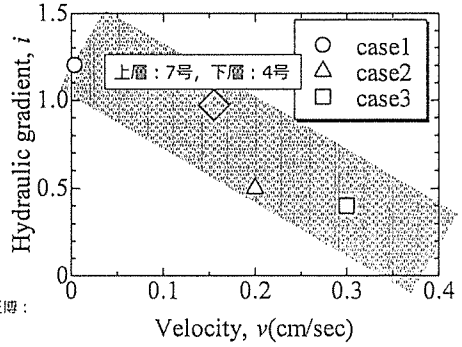


・パイピング直前の流量からみかけの流速を算出.
・砂層全断面を透水すると仮定．case2，3については砂層と礫層との透水性が著しく異なるため礫層のみ透水すると仮定.
・case2，3では噴砂している箇所としていない箇所では流速が異なるためここではあくまで平均流速として求めている．（局所的には流速が大きいと思われる．）

パイピングの照査



参考：三木博史，山田哲也，藤井厚企，野口典孝，佐藤正博：堤防基礎地盤のパイピング破壊に関する模型実験，建設省土木研究所　材料施工部　土質研究室，1996.



・被災箇所，非被災箇所のデータを収集しプロットする
→重点監視区間の抽出と危険度評価

堤防内と流速
噴出流体の流速
と粒子濃度，地盤の密度

- 基盤の層構成流速，contact erosionにおける境界面の挙動
- 間隙水流れの流速と空洞内の水の流速，土砂濃度と土砂の移動量
- 基盤の侵食速度

今後の調査・計測で必要なこと：従来の視点に加えて

（流速の測定）

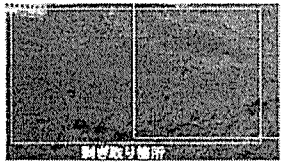
- 間隙流速の計測方法
  （微流速計，音波流速計，熱位流速，塩分などトレーサー測定，サーモグラフィー測定などを試し中．．．）
- パイピング孔内の流速（土砂流式）
  （上記，内部の密度測定：音響トモグラフィ，比抵抗，水分計などを試行準備中）
- 漏水の流速，侵食速度（c.f. 外力波形）
  （漏水孔径，漏水間隔，噴出高さ，濁度，粒度）
- カメラの画像，カメラの増設

相似側

- メカニズムを考えた大胆な力学モデルの組み合わせが必要
- 室内模型実験結果の適切な利活用
- 流れの種類：間隙水流れの流速と空洞内の水の流速，土砂流？
- 堤体変形モード：すべり，崩落などは強度と破壊サイズでかわる？

外観調査『粒子配向』＋治水地形分類＋証言蓄積（多面的な被災記録）

- 地盤の記憶の抽出（cf. 遺伝子分析）
- 地学の知見
- 剥ぎ取り断面：不攪乱でなくてよい
- 粒子配向と接触配向



子吉川：10.8K，右岸

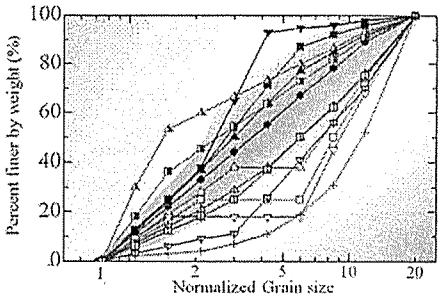
堤体の変形量と変形モードの蓄積と必要最小限の内部推定と今後の危険度評価

- 医者の問診，打診レベル
- 99%の非変状事例を活かす

『粒度分布』『粒子配位数』による内部侵食ポテンシャルと劣化度評価（維持管理）

- 粒度分布形状と間隙構造（サイズと繋がり）
- 粒子の配位数
- 攪乱試料でよい；剥ぎ取り断面の照査
- 「いままで．．だったのに，なぜ今回は．．．」

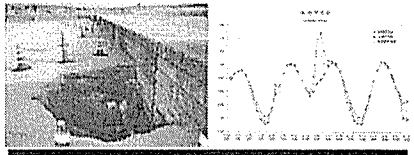
粒度分布形状による内部浸食挙動の判定基準

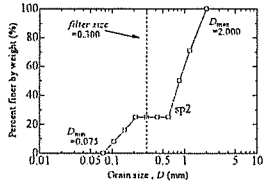


	内部浸食なし	内部浸食に強い形状	内部浸食の負の連鎖
流出量	なし(※)	少ない	多い
間隙径	小さい	中程度	大きい
連続性	低い	中程度	高い
配位数	多い	多い	少ない
流出後	流出し易い粒度へ	流出し難い粒度へ	流出し易い粒度へ
	粒度がそろっているので内部浸食しない（粒子は内部で移動できない）	内部浸食量は少なく、連鎖的流出は発生しない	内部浸食量は多く、連鎖的流出が発生

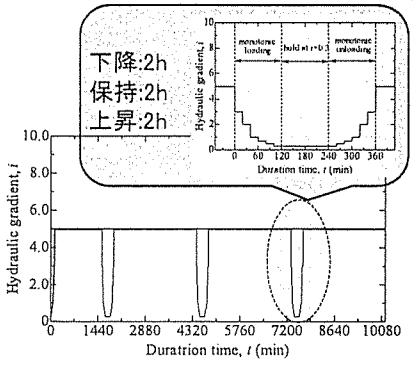
※境界からの流出に注意

動水勾配の繰返し載荷(水位変動)

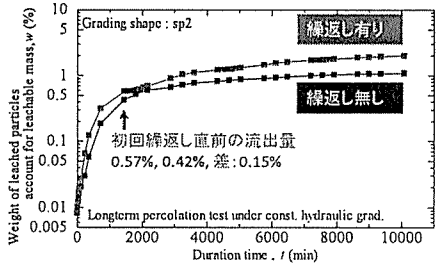




長期保持中の2日ごとに水位変動



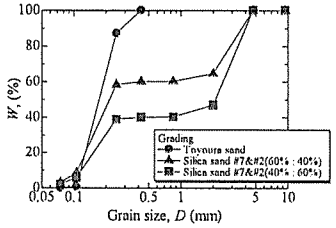
流出量の経時変化(長期)

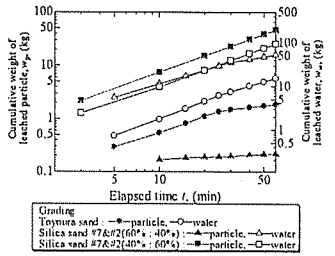


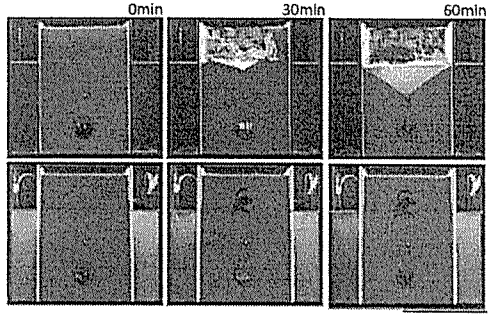
最終的な流出量:1.08%, 2.00% (1week)

水位上昇だけでなく低下時にも流出

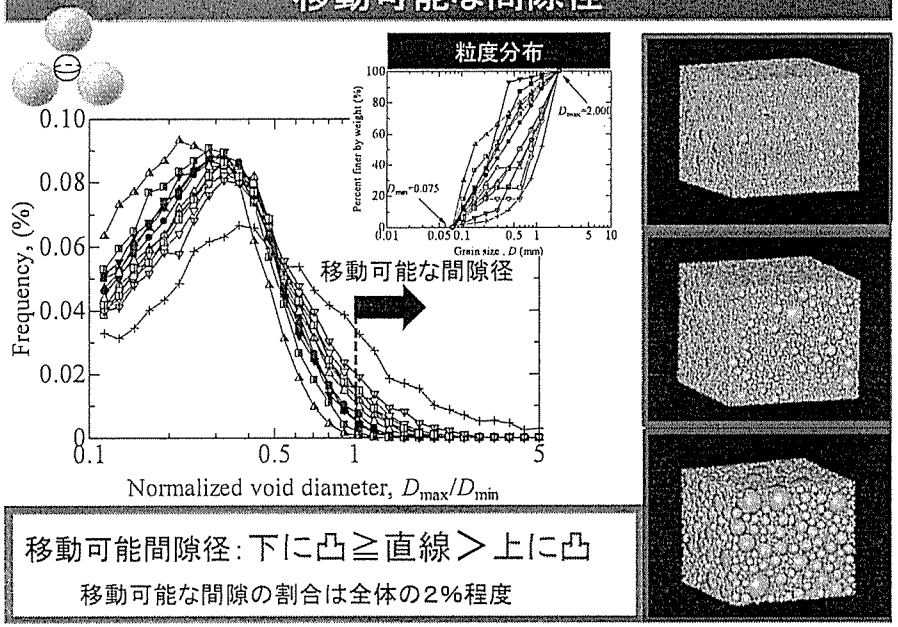
陥没の実験からみる侵食時の水量と土量







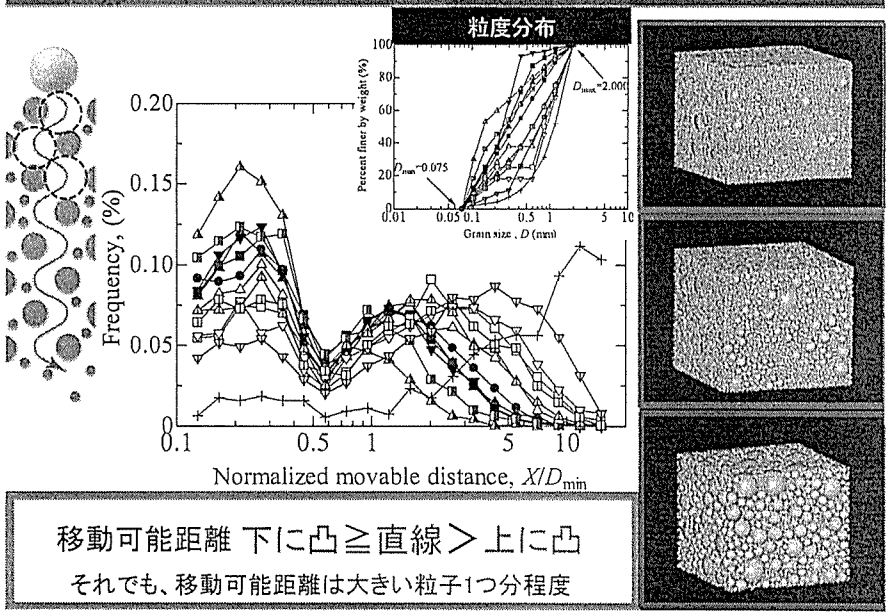
移動可能な間隙径



移動可能間隙径：下に凸≧直線＞上に凸

移動可能な間隙の割合は全体の2%程度

間隙の連続性（移動可能な道のり）



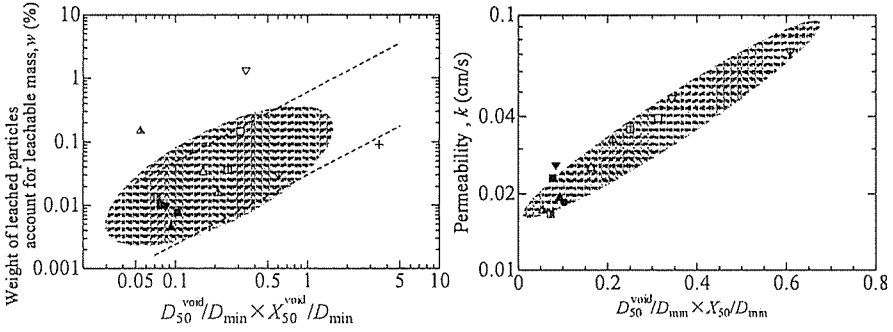
移動可能距離 下に凸≧直線＞上に凸

それでも、移動可能距離は大きい粒子1つ分程度

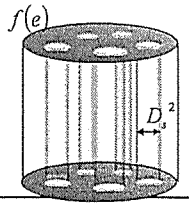
Hagen-Poiseuille流れの検討

総流出量と間隙径×連続性

透水係数と間隙径×連続性



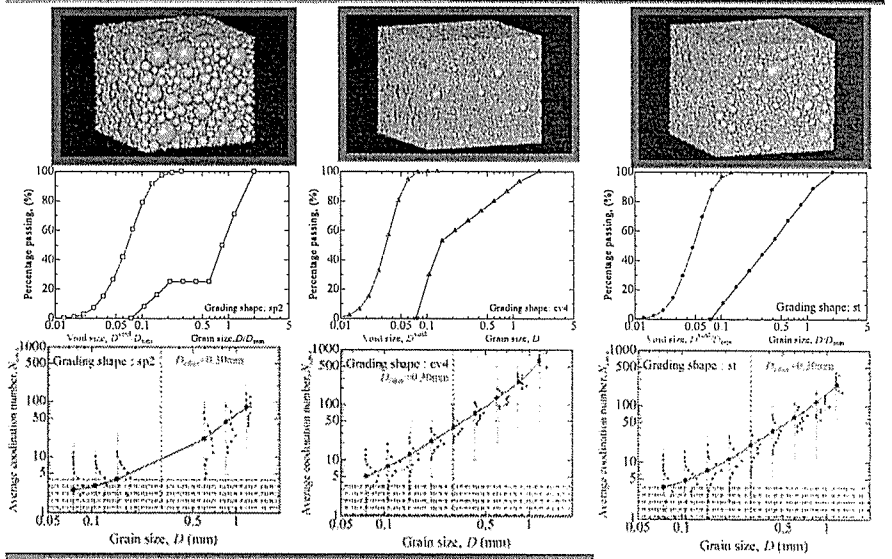
透水係数： $k \propto \frac{1}{\eta} \cdot D_s^2 \cdot f(e) \propto C \cdot D_{50}^{void} \cdot X_{50}^{void}$



D_s^2 ➤ 間隙の平均径　　D_{50}^{void} ➤ 間隙の平均径

$f(e)$ ➤ 間隙径の粗密（間隙の繋がり度合い）　　X_{50}^{void} ➤ 間隙の連続性

サイズ毎の粒子の配位数



下に凸のみ細かい粒径でNc<4の不安定領域に位置

地中レーダによる路面下の空洞探査について

吉澤　幸佑

関東地方整備局　関東技術事務所　施工調査・技術活用課　（〒270-2218　千葉県松戸市五香西6-12-1 ）.

関東地方整備局管内における路面下の空洞探査は、2011年度より関東技術事務所にて一括契約している。探査結果から得られた空洞情報については各国道管理担当事務所に報告され、道路陥没を未然に防止するための維持管理に必要となる情報として用いられており、その後の空洞補修は各国道管理担当事務所で実施されている。

本報告では、空洞探査の概要と空洞探査の流れ、空洞探査精度向上のため取り組むべき内容について報告する。

キーワード　路面下空洞探査，電磁波，比誘電率，地中レーダデータ

1. はじめに

1980年頃、首都圏で道路陥没が多発し、社会問題となった。当時、空洞探査は実施されていたが、その方法が手押し式の地中レーダによるもので、効率よく広範囲に調査できる方法ではなかった。そこで、空洞探査を車で走りながら行える道路調査車が開発された。

また、当初事務所単位で空洞探査業務を発注していたが、空洞探査により得られた管内全域の情報を一括管理・蓄積することで、より効率的に今後の空洞探査に活用することができるよう、2011年度から関東地方整備局管内の空洞探査業務を関東技術事務所で一括して発注している。

2. 空洞探査の概要

(1) 空洞の主な発生原因

図-1に空洞の主な発生原因を示す。

a)埋設管の老朽化に伴う損傷

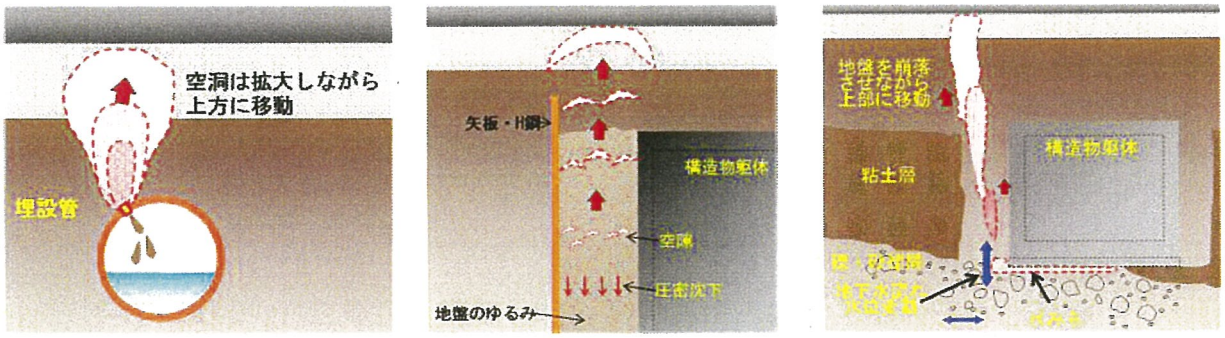
埋設管が破損した場合、破損箇所から土砂が吸い出され、空洞が形成される。空洞上の土砂は落下し、落下した土砂が再度吸い出されることで、空洞の位置は拡大しながら上方へ移動する。

b)地下構造物の埋め戻し土のゆるみ

構造物躯体まわりの締固めが不十分なために地盤にゆるみが発生した場合、圧密沈下を起こし空隙ができる。そして、空隙同士結合し規模を拡大していくことで空洞が形成される。

c)水みちの存在

構造物躯体まわりに水みちが存在していた場合、水み



a)　埋設管の老朽化に伴う損傷　　b)　地下構造物の埋め戻し土のゆるみ　　c)　水みちの存在

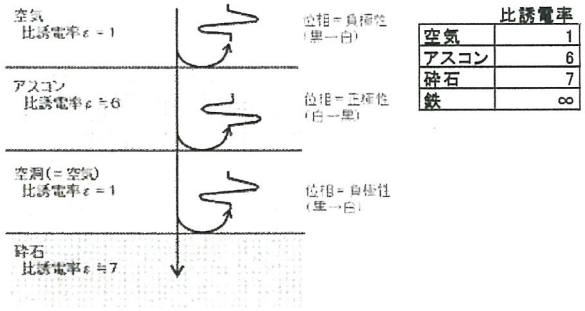
図-1　空洞の主な発生原因

ちにより土砂が吸い出されることで空洞が形成される。

(2) 探査原理

空洞探査は、電磁波による舗装材料と空洞の比誘電率の違いを利用した探査方法である。電磁波は、比誘電率の違う物質との境界層で反射・透過する性質を持ち「比誘電率が高い物質から低い物質」、「比誘電率が低い物質から高い物質」では図-2のように反射波の位相が逆になる。空気は、舗装材料や埋設物に比べて比誘電率が低いため、層の境界等による反射波と空気との反射波では位相に違いが出る。よって反射波を受信していくことで空洞の可能性が高い異常信号を抽出することができる。

本探査における地中レーダデータは、反射波の受信を道路調査車の走行方向に連続的に実施し白黒の濃淡で可視化することで、図-3のように目視により空洞と異物の可能性のある異常信号を抽出することができる。比誘電率が高い物質から低い物質での反射波を正極性（空洞と考えられる信号）とし白→黒で表記、比誘電率が低い物質から高い物質での反射波を負極性（異物と考えられる信号）とし黒→白で表記した。



	比誘電率
空気	1
アスコン	6
砕石	7
鉄	∞

図-2　比誘電率による反射波の違い

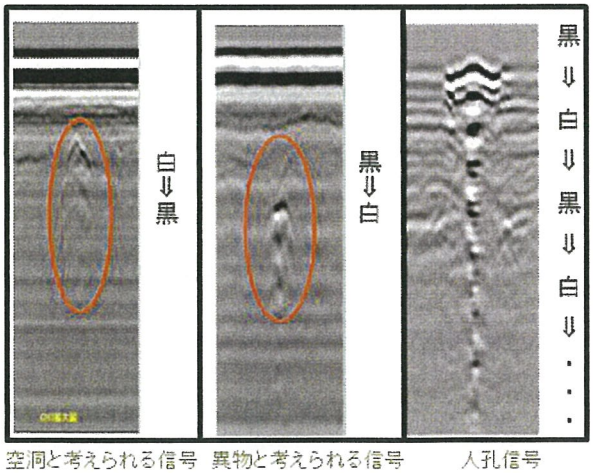


図-3　反射波の白黒での可視化

3.　空洞探査の流れ

空洞探査は、一次調査と二次調査から構成され図-4に示す作業フローに則って実施される。

(1) 一次調査

車道部の一次調査は、道路調査車を使用し時速30～45kmで走行しながら迅速かつ広範囲に実施する。図-5に示すように道路調査車には、横断方向に７つの地中レーダを搭載しており、１回の走行により１車線分の探査を

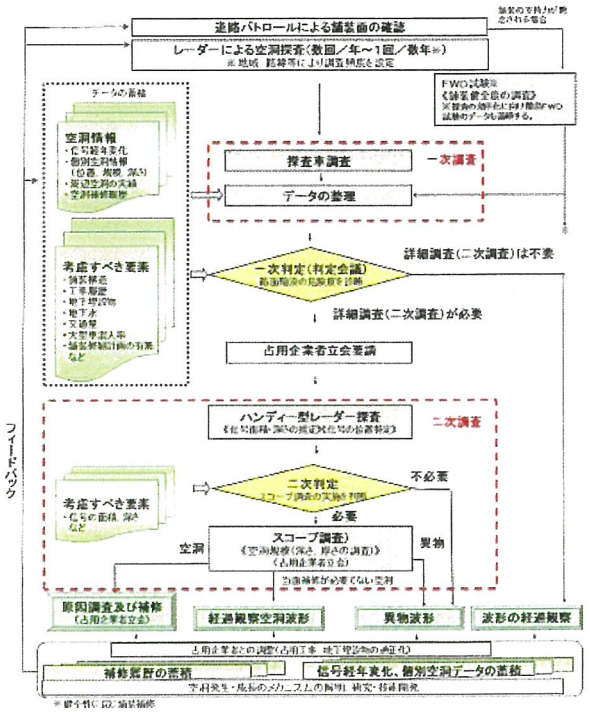


図-4　路面地下の管理（陥没防止策）作業フロー[1)]

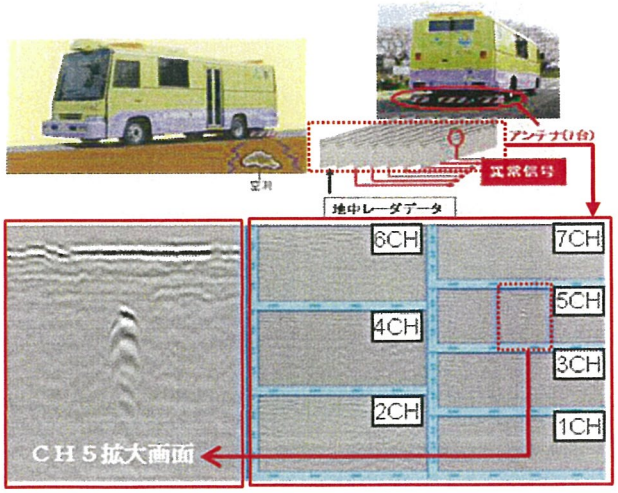


図-5　道路調査車

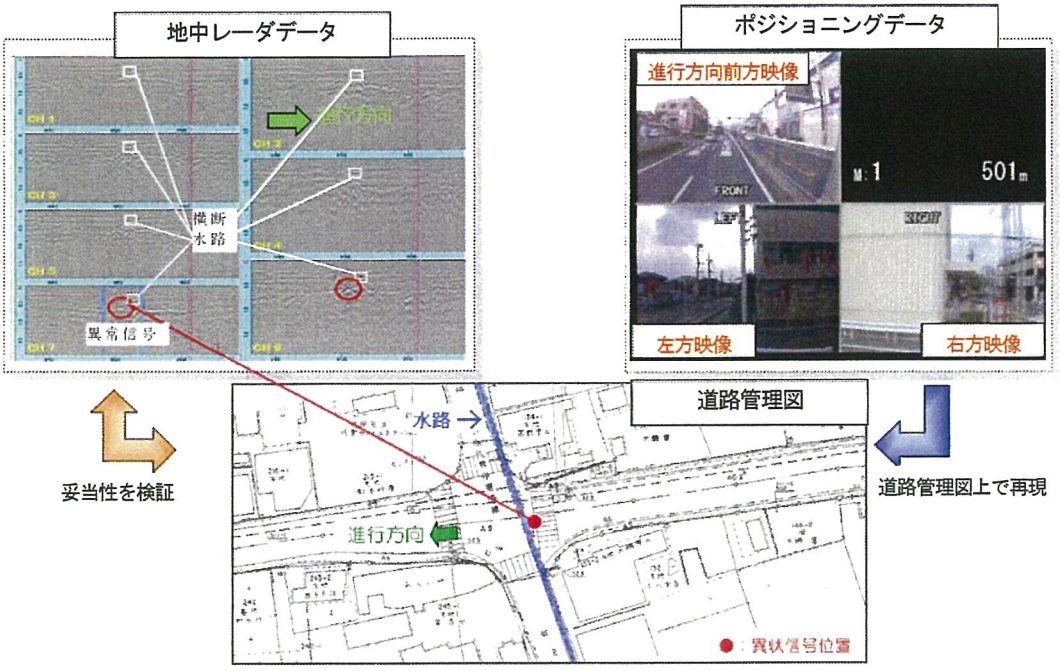


図-6　空洞位置の特定方法

実施することができる。そして、取得された地中レーダデータから空洞の可能性のある異常信号を抽出・整理する。

地中レーダデータと現地との整合については、地中レーダデータと連動した周囲映像（ポジショニングデータ）を取得することで図-6に示すように地中レーダデータ、ポジショニングデータから空洞位置を道路管理図上で確認する。

(2) 判定会議

一次調査により抽出された異常信号は、特徴別に分類・整理し、外部の専門家を含めた判定会議により二次調査の必要性が審議される。二次調査の必要性は、「個別空洞情報（極性、独立性、経年変化、規模、深さ）」、「空洞履歴」、「舗装構成、地下埋設物、地下水、交通量、道路・地域特性、工事履歴等」を勘案し、総合的に判定している。

(3) 二次調査

a)ハンディ型レーダ調査

判定会議により二次調査が必要と判定された異常信号の位置において、まずハンディ型レーダによる調査が実施される。ハンディ型レーダ調査は、手押し式の機械を用いて図-7のように地中レーダデータを取得する。ハンディ型レーダ調査は、空洞の可能性判定、空洞の位置特定、空洞の平面的な広がり推定を実施し、その結果によりスコープ調査を実施するべきか否か判断される。

b)スコープ調査

スコープ調査では、空洞と推定された異常信号箇所を図-8のように削孔し、スコープを挿入して削孔断面の撮影を行い空洞の厚さと深度を確認する。

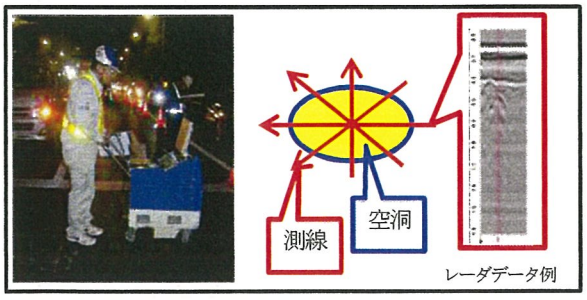


図-7　ハンディー型レーダ調査

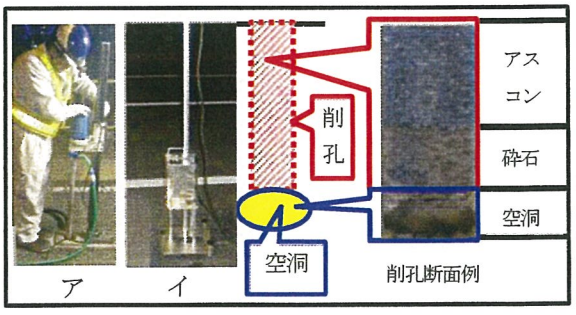


図-8　スコープ調査
（ア：削孔、イ：スコープ挿入）

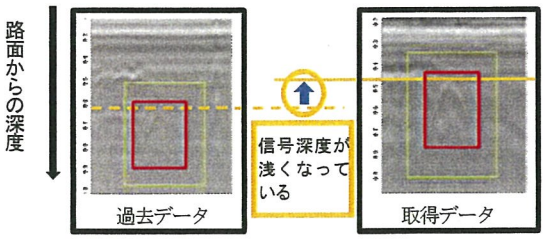


図-9　地中レーダデータの過去信号との比較
実線：取得データ信号深度
点線：過去データ信号深度

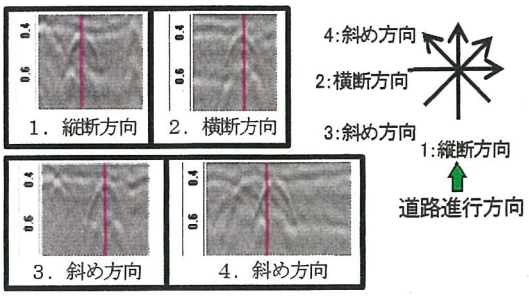


図-10　ハンディ型レーダ調査結果

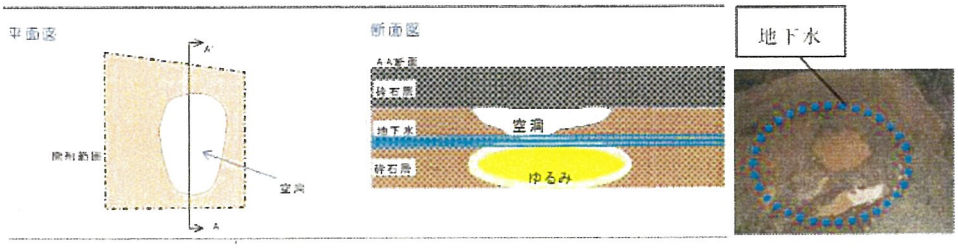


図-11　空洞発生状況

4.　調査結果

空洞探査から実際に空洞が発見された事例を述べる。

(1) 空洞探査結果

図-9に地中レーダデータ信号のうち極性が不明瞭で空洞か異物かの判断が難しい信号例を示す。過去に取得した地中レーダデータと比較した結果、深度が浅くなっていることが確認できた。信号の深度が浅く変化している場合、経年により空洞上の土砂が落下し、空洞が上方へ移動した可能性が高いと考えられる。判定会議の結果、二次調査を実施した。

ハンディ型レーダ調査の結果、図-10に示すとおり一次調査では取得できない横断方向、斜め方向の地中レーダデータから白から始まる白黒の信号を確認することができた。調査箇所は空洞の可能性が高いと判断し、スコープ調査を実施した。

スコープ調査の結果、空洞と滞水を発見することができた。

(2) 開削調査結果

国道管理担当事務所により、本空洞は開削による空洞発生の原因調査と補修が行われた。図-11に示すとおり空洞下部にゆるみと地下水を確認した。空洞は、地下水の変動により徐々に空洞が形成され上方へ移動したと事例と考えられる。

なお関東技術事務所では開削調査の結果を調書として蓄積・整理し、それらを解析することにより路面陥没未然防止に役立てている。

5.　空洞探査精度向上に向けた取組

新たに取得した地中レーダデータを過去に取得した地中レーダデータとの信号変化について比較することで空洞探査精度は向上することから、過去に取得した地中レーダデータと速やかに比較・検証できるよう地中レーダデータの蓄積・整理に取り組んでいる。

その他空洞探査精度向上に向けた取組として、平成26年度より道路形状が変わっても過去に実施した二次調査箇所の正確な位置が把握できるよう、二次調査実施時にGPSによる緯度経度の計測を実施することとした。

これからも空洞探査精度向上につながる新たな知見についての検討を行い、今後の空洞探査に反映させることができるよう空洞情報等の調査結果は随時蓄積・整理していきたい。

6.　おわりに

国道管理担当事務所には大変ご多忙の中、詳細調査の現地立会、判定会議の資料作成等ご協力いただき、心より感謝いたします。今後とも国道管理担当事務所と連携を図り路面陥没未然防止に努めていきたいと思いますため、よろしくお願いいたします。

参考文献

1)　平成２３年３月　直轄国道の舗装（路面）に関する保全検討委員会　「路面地下の適切な管理のあり方について」

GEO SEARCH
人の命と暮らしを守る、インフラの内科医ジオ・サーチ

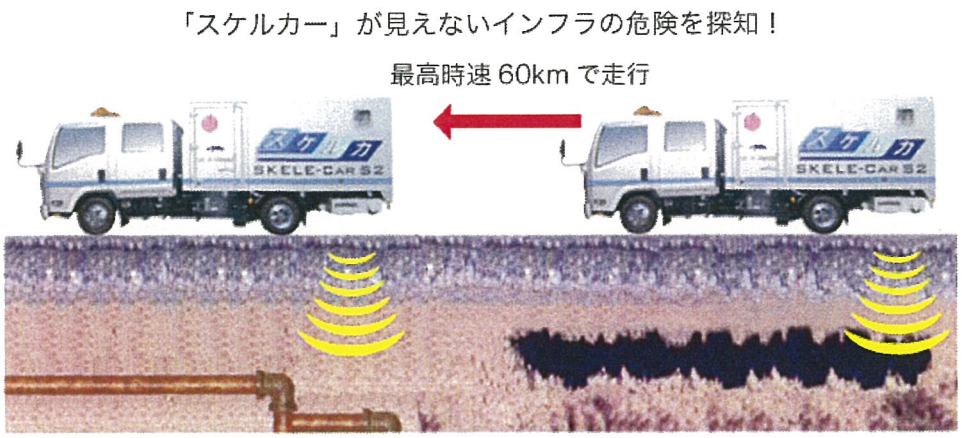
☎ 03-5710-0200

サービス・技術

「スケルカ®」技術とは

3・11東日本大震災の経験から生み出した、革新的！　総点検手法

短期間ですべての路線を一気に診断する「スケルカ®」技術

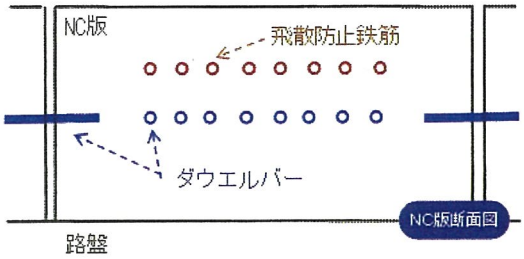


最先端の技術力でインフラを守る

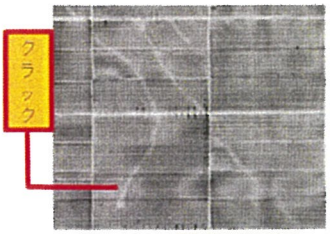
高速・高解像度の「スケルカ®」事例

従来技術を圧倒する高密度なデータ取得技術を開発し、分析能力が大幅に向上しました。また、縦断、横断、水平の3次元評価でデータ解析することで、2次元評価では判別できなかった地中の空洞、劣化箇所、埋設物などを正確に特定できるようになりました。

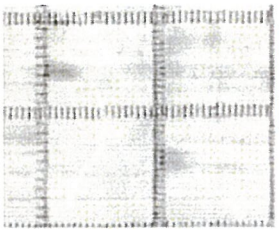
コンクリート版をスケルカ中



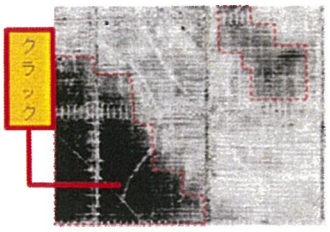
深度ごとのスケルカデータ



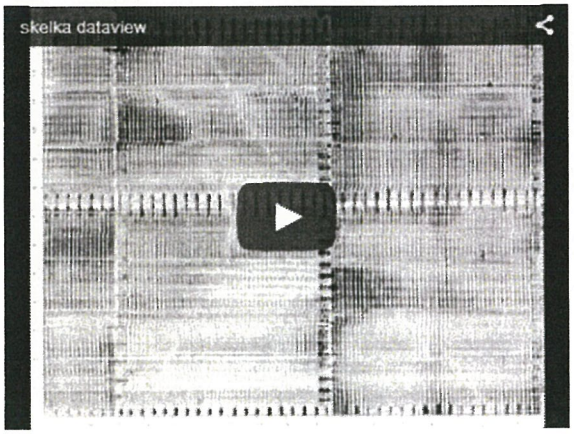
飛散防止鉄筋配筋状況
(10cm)



ダウエルバーの設置位置
(20cm)



コンクリート版下の空洞状況
(40cm)



最高時速60kmで調査可能。交通規制も一切不要に

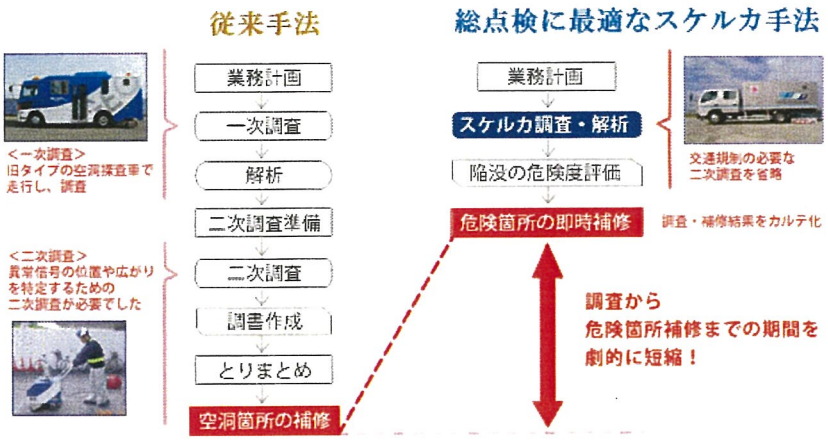
従来の探査手法では、探査車を用いた一次調査の後に、交通規制を伴うハンディ型探査機を用いた詳細調査が必要でした。「スケルカー」の開発により、詳細調査が不要となり、劇的な工期短縮と安全性向上を実現しました。

スケルカーSシリーズ

スケルカーDシリーズ

スケルカーミニ

業務フローチャート



サービス一覧

路面下空洞調査

高解像度センサーを搭載したスケルカーが、1日当たり100kmの路面下のデータを取得。空洞診断エキスパートが、独自の解析システムを駆使して正確に空洞を発見し報告します。従来手法と比べ、調査・報告までの期間を劇的に短縮（約1/10）、大幅なコストダウン（約1/2）を実現しました。

以下の動画画面で、サービスの詳細を解説しています。

橋梁床版抜け落ち予防調査

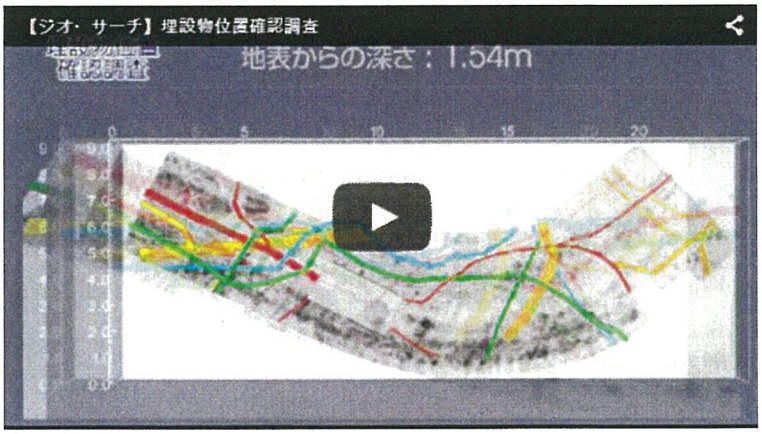
世界で初めて、目に見えなかった床版内部の劣化箇所を素早く・正確に・低コストで可視化しました。時速60kmで走行できるスケルカーで、1日当たり30橋のデータを取得し、橋梁診断エキスパートが、床版内部の劣化カルテを作成します。橋梁床版の内部劣化を短期間で総点検することができます。

以下の動画画面で、サービスの詳細を解説しています。

埋設物位置確認調査

道路の下には、数多くの埋設物が複雑な状態で布設されています。「スケルカ®」技術を活用することで、埋設物の位置と布設状況を正確に把握することができます。新規埋設物のルート選定や既存埋設物の移設設計、安全な掘削工事が効率的に行えるようになりました。

以下の動画画面で、サービスの詳細を解説しています。



サービスに関するお問い合わせはこちらまで

お電話からのお問い合わせ：

本社（東京）	03-5710-0200
大阪	06-6190-6558
名古屋	052-959-2037
北海道	011-252-2150
仙台	022-208-5450
岡山	086-270-8485
福岡	092-434-5301

パソコンからのお問い合わせ：

✉ お問い合わせフォーム

Copyright© 2013 GEO SEARCH CO.,LTD.All Rights Reserved.

平成27年1月8日

第8回　「浸食・浸透破壊・洗掘WG」・「堤防WG」合同会議

中央開発株式会社　坂本淳一

堤防（の被災）に関する疑問

○「被災」の定義がはっきりしない。堤防がどのような状態になると「被災」なのか。

定規断面を維持できない？

→未完成堤防は被災状態か。

→定規断面が限界状態ではないので、高さが足りない・幅が足りないとも言えない。

のり崩れの発生、パイピングの発生？

→破堤・決壊に至るとは限らない。ガマも被災か？

破堤・決壊したら被災？

→被災した結果の状態。

○空洞が生じ、堤体の陥没を引き起こすときの限界状態は何で決まるのか。

例えばパイピング。基礎地盤に生じたパイピング孔が崩壊し、堤体の陥没を引き起こす。このとき、パイピング孔の径（大きさ）によるのか、地盤内のパイピング孔の密度（地盤がスカスカ）によるのか、あるいは・・・。

レーダ的探査手法など、何を用いてモニターすればいいかが分かってくる？

○不飽和浸透特性

実降雨（ハイエト）を入力したのに堤体内水位を再現できない。総雨量ベースの方が再現性がよい。

○降雨浸透の過程において、蒸発散を考慮する必要はないか。

蒸発散量の計算は各種あるが、簡易なものを組み込むことができれば、実業務での適用も可能。

以　上

河川堤防の浸透破壊に関する研究課題の例

2015.1.8　応用地質㈱　阿部知之

調査	縦断方向の概査手法としての物理探査技術の適用性検証

・物理探査は、堤防縦断方向の概査手法として適用性が高いと考えられ、特にボーリングデータの補完、弱点箇所の抽出等に必要な調査手法として期待される。
・羽月川における探査事例を次頁以降に示した。
・被災箇所での現場実証が不足していることから、今後、同様の探査事例を蓄積し、物理探査手法の適用性を検証していく必要があると考えられる。

対策	堤内基盤排水工法の実用化

・欧米では堤防の浸透対策としてリリーフウェル工法が適用されている事例があるが、国内での適用実績は少ない。
・堤内基盤排水工法は、従来の川表遮水工法に代わる工法として実用化への期待は大きい。
・今後、適用上の課題解決に向けた取り組みが必要と考えられる。

評価	パイピングを生じやすい粒度条件の究明

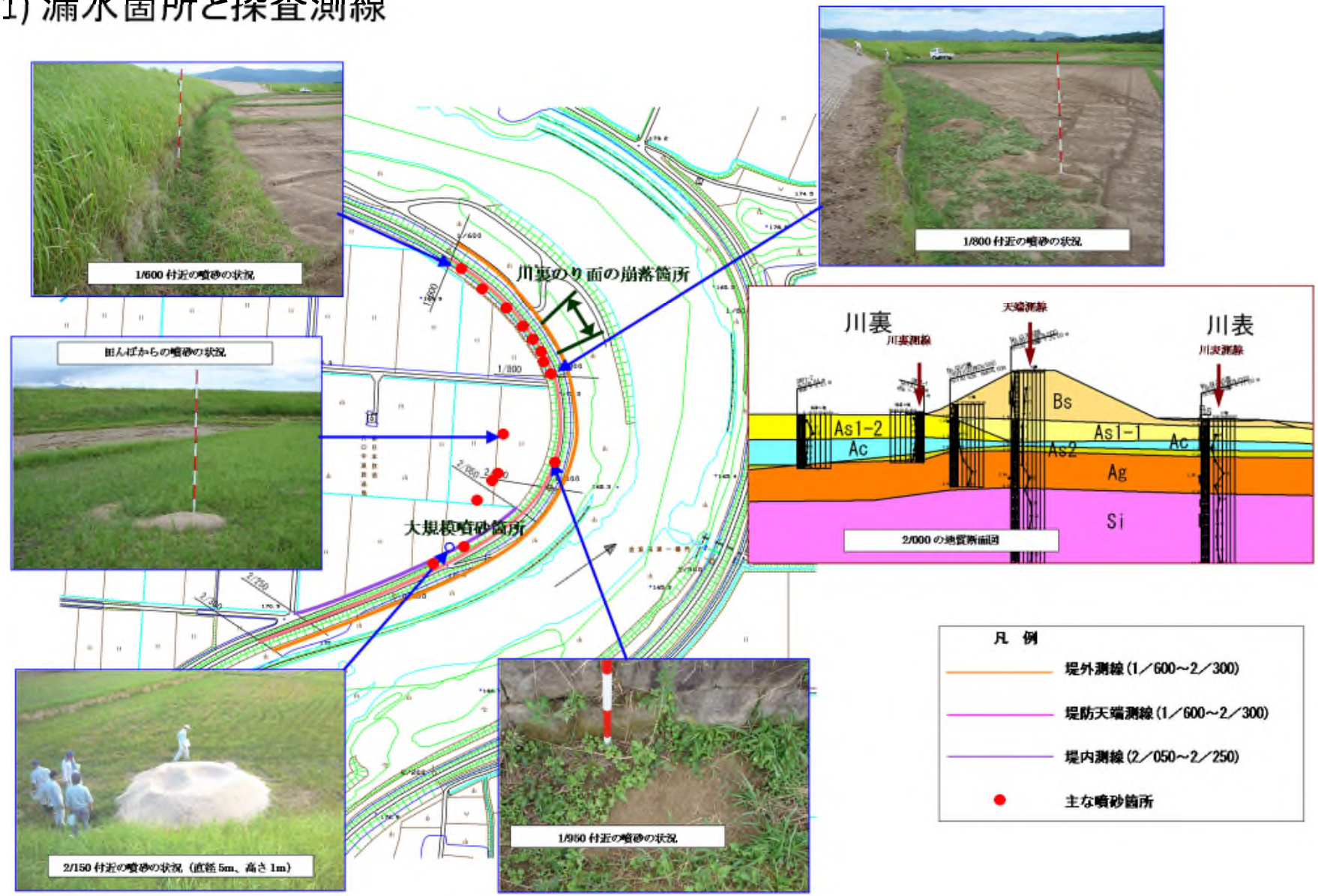
・パイピングを生じやすい粒度条件が明らかになることで、新たなパイピング判定法の確立が期待される。
・粒度条件を変えた多数の試料について室内実験を実施する必要があると考えられる。

維持管理	モニタリングによる出水時安全監視技術の適用性検証

・出水時の安全監視は目視によって行っているため、変状等の発生を早期に発見することは難しい状況にある。
・今後、モニタリング技術の開発や適用事例の蓄積等を行い、安全監視のためのモニタリングシステムの実用化が必要と考えられる。
・監視項目としては、堤体内部の湿潤状態・間隙水圧・のり尻部の動水勾配・漏水・地表面の変位等が考えられる。

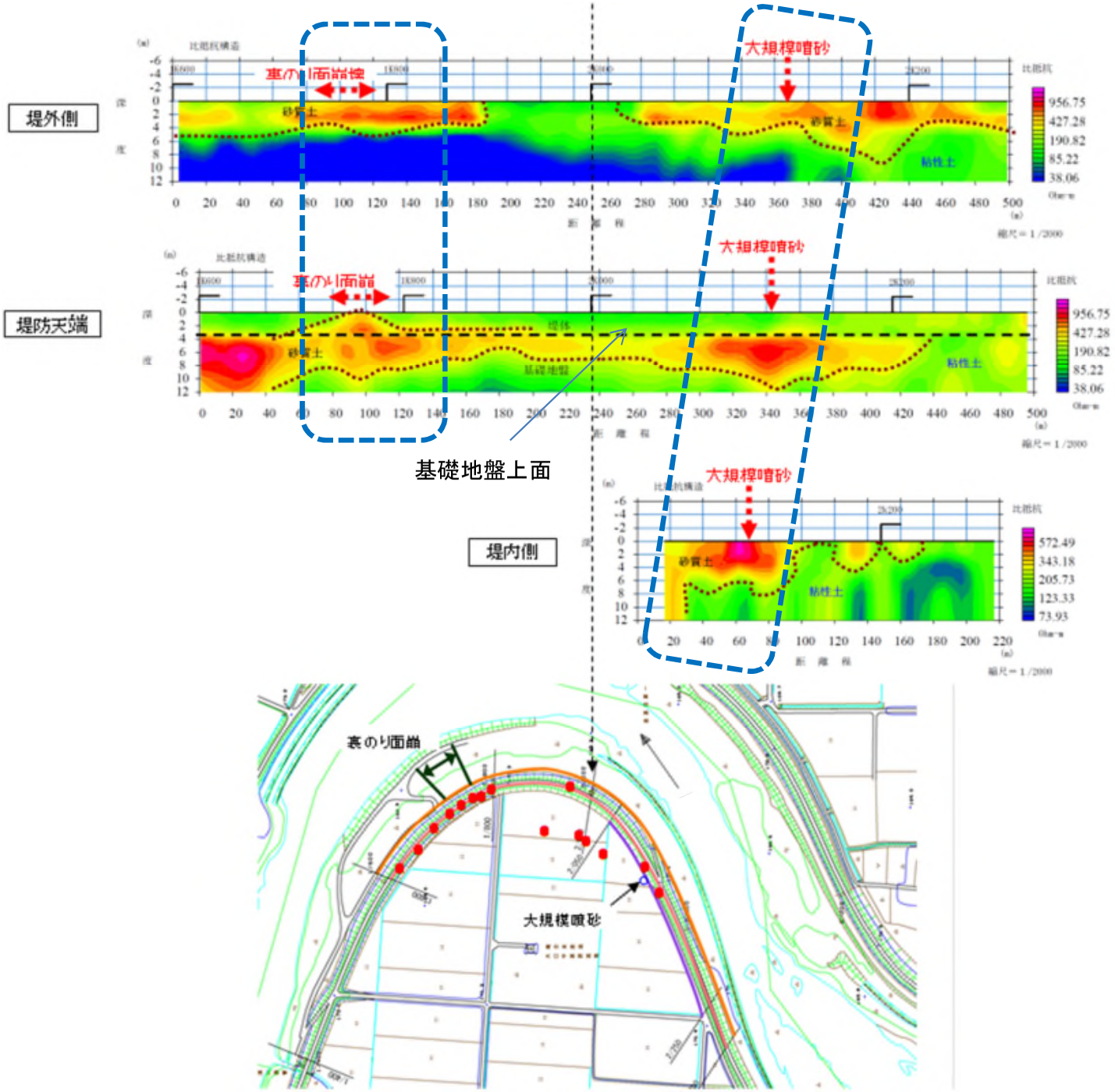
（参考資料）漏水等が発生した箇所における物理探査の適用事例

(1) 漏水箇所と探査測線



大規模噴砂を伴う漏水と川裏のり面の崩壊が発生した箇所において、5ヶ月後に物理探査を実施した。

(2) 牽引式電気探査により得られた堤防縦断方向の比抵抗分布



◆大規模噴砂箇所、裏のり面崩壊箇所とも高比抵抗部に当たっている。

◆大規模噴砂箇所においては基礎地盤表層部に高比抵抗ゾーンが堤防横断方向に連続している。

河川堤防の強化の取り組みについて（案）

（1）現状の調査、把握

（2）堤防破壊に至るメカニズムの解明

（被災・変状の把握）

調　査 ← 維持管理

（7）堤防のモニタリング

（8）災害時の迅速な対応

情報共有

（9）情報共有・体制整備

（3）堤防の評価

（4）対策箇所の重点化、優先順位付

評　価 → 対　策

（5）対策工法の設計

（6）対策工事の実施

国民、住民

人材育成

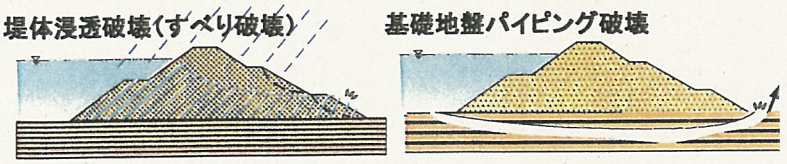
（11）人材育成

（10）適切なコミュニケーション

「すべり、パイピング、侵食　決壊に至るメカニズム」と堤防の安全性

○堤防破壊のメカニズムのイメージ

浸透による破壊	侵食による破壊
堤体浸透破壊（すべり破壊）と基礎地盤パイピング破壊	激しい洪水流により堤防が侵食され、堤防が決壊



○河川堤防に係る基準類

- 「河川管理施設等構造令」
- 「河川砂防技術基準」設計編
- 「河川堤防設計指針」
  - 浸透に対する照査
    - 滑り破壊に対する安全性
    - 基礎地盤のパイピング破壊に対する安全性
  - 侵食に対する照査

→堤防の変形の有無について照査。変形の程度は？

地盤工学委員会堤防小委員会「浸食・浸透破壊・洗掘 WG」＋水工学委員会河川部会「堤防 WG」

平成 27 年度第 2 回（第 9 回）合同会議　議事録（案）

日　時　：　2015 年 3 月 25 日（水）16:00～19:00
場　所　：　土木学会　F 会議室
出席者　：　[浸食・浸透破壊・洗掘 WG]
前田，丹下，森，李
[堤防 WG]
服部，溝口，内田，松本，阿部

（敬称略）

■議題

１．河川技術シンポジウム投稿・総説の内容について
２．アカデミックリサーチマップ
３．今後の予定

■配布資料

河川技術シンポジウム投稿原稿（案）

■議事内容

１．河川技術シンポジウム投稿・総説の内容について

・「パイピング」というとやや限定的になるため、「浸透破壊」という言葉を使うようにしたい。
・既往の文献による知見についても追記する。
・パイピング、泥濘化、浸透性破壊等の用語については、最初に出てくるところで定義が必要。
・現状の河川堤防の安全性評価の考え方にも触れておいてはどうか。
・進行性破壊は時間の概念を伴う。
・突発的に発生する破壊も含めて扱うものとする。
・破壊がどこかで止まるか、止まらないかが重要。浸透破壊が進行して破堤に至ると考えられる。
・危険箇所を絞り込み、その後に詳細な調査を実施するなど、目的に応じた調査方法の組合せも必要。
・河川堤防の特徴の一つとして、堤体土の不均質性が大きい点にある。
・一連区間の設定が適切になされているかについても疑問な点がある。中間土の扱い（土質区分）や不飽和土としての扱い方についても今後の課題と考えられる。
・まずは弱点箇所（ばらつき）を知ることが重要であり、次の段階で弱点箇所の詳細調査を実施し、必要であれば補強して安全性を向上させることを目指す。

２．リサーチマップについて

・短期、中期、長期といった視点での整理は現状では難しいことから、総説に掲載するリサーチマップ上には、時間の概念は持ち込まない。
・配布資料中に記載されているシート１～シート４の主要項目（浸透破壊による破堤メカニズムを解明するために必要な研究課題）をマップ上に記載する方向で、シートマップ案を作成する

(担当：溝口委員)。

３．今後の予定

○河川技術シンポジウム投稿原稿について

・原稿作成の分担は以下のとおりとする。

2，3(1)　：阿部委員
3(2), 4(1)　：前田副リーダー
4(2)　：溝口委員
5(1), (2), (3)：前田副リーダー，李委員，森委員
6　：溝口委員

・内田委員に全体のとりまとめをお願いする（学会への提出期限は 4 月 3 日 17:00)。
・原稿は 3 月 31 日（火）までに内田委員宛に送る。

○連携ＷＧの成果について

・連携ＷＧの成果については、４～5 月にとりまとめて冊子を作る。主に、ＷＧの議事要旨と活動中に作成した資料をもとに構成する。
・本連携 WG は河川技術シンポジウムへの総説発表をもって区切りをつける。

以上

地盤工学委員会堤防小委員会「浸食・浸透破壊・洗掘 WG」＋水工学委員会河川部会「堤防 WG」

平成 27 年度第 3 回（第 10 回）合同会議　議事録（案）

日　時　：　2015 年 5 月 14 日（木）15:00～17:30
場　所　：　土木学会　役員会議室
出席者　：　[浸食・浸透破壊・洗掘 WG]
前田，高橋，森，竹下，坂本，李
[堤防 WG]
服部，溝口，松本，阿部

（敬称略）

■議題

1．河川技術シンポジウム OPS の実施
1) 連携 WG 投稿論文の説明
2) OPS の内容案
3) 議事進行案
2．連携 WG：2 年間の集大成報告書の作成
3．その他

■配布資料

資料 1：OPS 関連資料
資料 2：連携 WG 論文＋関連論文
資料 3：集大成報告書案

■議事内容

1．河川技術シンポジウム OPS の実施

・堤防 WG 担当の OPS2 を 6 月 10 日の 15:00～15:50 に開催することになった。
・服部リーダーより、OPS2 の内容（案）と連携 WG 論文の概要について説明があった。
・OPS2 のテーマは、連携 WG 論文のタイトルと同様に「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」とする。
・議事進行は服部リーダーの案を基本とし、時間配分については微調整する。
・３つの教訓・課題に関する発表は、ARM との関係を意識した内容とする。
・討議では、発表者は全員残って討議に参加する。
・討議の最初の 3 分間で ARM の概要について説明するとともに、各課題に関する過去の論文数を示した後、討議に移る。
・ARM の図中には３つの教訓・課題との対応を示す。
・論文数の集計は、過去の河川シンポ、堤防シンポを対象とし、李委員にお願いする。
・ARM を見せながら、研究が不足している領域、優先順位等に関する意見が出てくるとよい。
・個別の論文に対する質問等が出ないようにしたい。
・堤防横断方向だけでなく縦断的な視点の重要性を指摘できるとよい。
・メカニズム的な研究と現場での疎なデータをいかに結び付けていくかが大きな課題。

・高橋委員、岡村先生，坂本委員（or 阿部委員）にも流れの中で発言していただく。
・最後に今後の課題や研究の方向性について示せるとよい。
・当日の昼休みに発表者が集まって事前の打合せを行う。
・パワーポイントのデータは 6 月 10 日の昼休みに発表用の PC にコピーする。
・パワーポイントは 5 月 29 日までに WG メンバー全員に送り、それに対する意見を 6 月 5 日頃までに集約する。

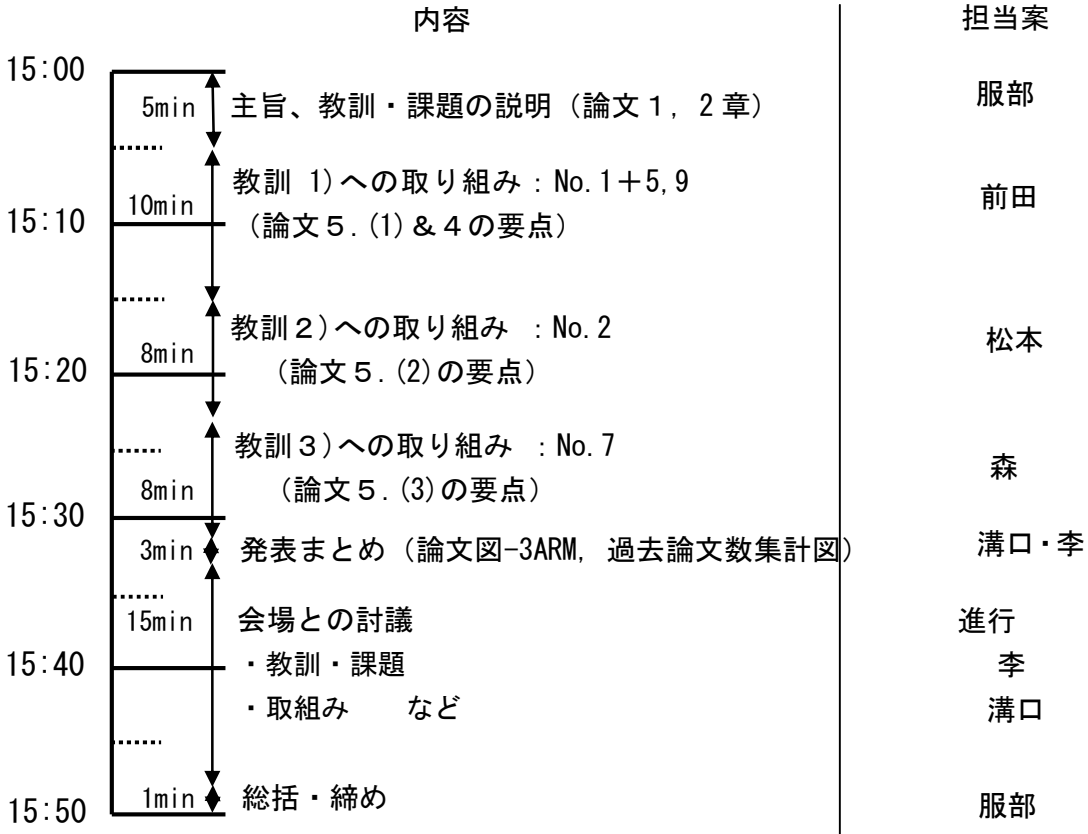
２．連携 WG：2 年間の集大成報告書の作成

・服部リーダーのたたき台（資料 3）に沿って作成する（初稿案作成は阿部委員）。
・印刷したものを河川財団に納めることも考える（＊）。
・打合せ資料については、公表しても問題がないかどうかを確認する。
・土木学会への図書登録も考える（＊）。
・印刷はモノクロにしてＣＤを添付する形もあるのではないか（＊）。
・「はじめに」は、服部リーダーと前田リーダーの連名で作成する。部会長の言葉も入れる。
・表紙は、矢部川の写真を付ける。
・今年の河川技術シンポジウムの成果も含める。
・9 月末に完成させることを目標とし、7 月末までに初稿を作成する（担当：阿部委員）。
・完成後に今年の堤防シンポジウム（11 月下旬～12 月初旬に開催予定）で紹介する。
・（＊）については初稿案作成後，堤防研究小委員会・河川部会の両会長に改めて諮って，決定する．

３．その他（今後の予定）

・河川シンポジウムの終了後には河川部会の体制が変わるが、早めに次期の WG を始動したい。次回の連携 WG は 8 月末か 9 月初めに開催する予定とする。

◆OPS2 の議事進行案（打ち合わせを反映しての最終版）



議事録作成：阿部・＊＊＊

以上

オーガナイズドポスターセッション１（OPS1）報告書

◆開催日時：2013 年 6 月 6 日（木）11:20～12:30

◆テ ー マ：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

◆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、というプロセスで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、堤体の下の層が、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。透水層の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、比較的実現象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。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的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検知しう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 A_C 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の関係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けると有難い。

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。

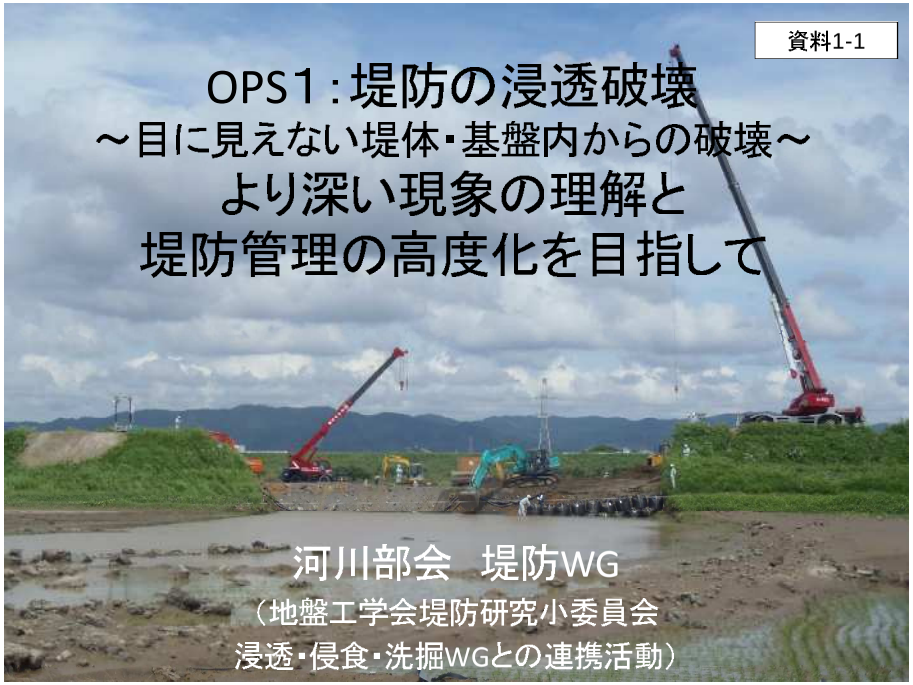
・服部

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。

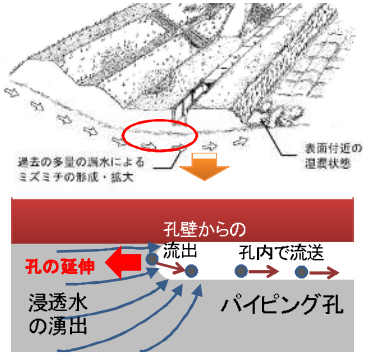
以　上



企画趣旨：パイピングのテクニカル・レビュー

◆浸透に対する堤防弱部の点検、安定性照査、浸透対策といった**種々の対応について検討する際の基本的な現象理解「パイピング」**

◆**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**、一般的にもそうした認識で議論することが多い。



★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。

「パイピング」関連技術の洗い直し

新たな知見・技術を踏まえて堤防管理の高度化に繋げていく

アプローチ

【事例を下敷きにした議論】

現場の事例。業務で見てきたこと。実験で見たこと。

実務ベースから：単にマニュアルの羅列でなく、その運用で加味した「工夫」
徹底的な被災事例調査

研究ベースから：現象の捉え方、力学的取り扱い

【水工学と地盤工学の文化（慣用化した考え方）交流】

例えば、「地表面上での流送量と収支（地表形状の変化）」と
「地表下の構造体としての強度・変位」

本OPSの進め方

①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

②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

OPS1：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

2. 基調講演（10分）
   - 2.1　矢部川被災原因調査
     渡部秀之：国土交通省九州地方整備局筑後川河川事務所 所長
   - 2.2　現地調査・実験で捉えられた浸透破壊現象
     佐々木哲也：(独)土木研究所地質・地盤研究グループ(土質・振動)上席研究員
   - 2.3　地盤工学分野での浸透破壊の研究動向
     前田健一：名古屋工業大学都市社会工学科　教授
   - 2.4　連携WGでの議論概要
     藤本弘之：株式会社ダイヤコンサルタント砂防・防災事業部　副事業部長

3. 会場・講演者交えての全体討議（25分）
   登壇者：渡部所長、佐々木上席、前田先生、藤本副部長

基調講演 「浸透破壊とはどういう現象か？」

2.1　矢部川被災原因調査

・調査から見えてきた現地の実態

・破壊の進展：住民・水防団の目撃情報・CCTV画像

・浸透破壊を起こした砂層の厚さ、面的な広がり　など

2.2　実験・現地調査で捉えられた浸透破壊現象

・浸透破壊現象はどこまで明らかになっているか？

・実験や現地調査で観察された浸透破壊の既往研究

2.3 地盤工学での浸透破壊の研究動向

・破壊機構はどこまで明らかになっているか？

・従来のパイピングとは異なる機構（細粒分の移動・抜け落ち）

・現象のとらえ方をボーダーレスに（地盤工学と河川工学の連携）

例えば土粒子に作用する力（動水勾配、浸透流速、掃流力）

2.4 連携WGの議論概要

・堤防研究小委員会と合同検討で整理した幾つかの「切り口」

→本OPSの議論を始めるにあたっての参考情報として

資料1-2

矢部川堤防決壊の被災メカニズムに関する考察

平成２５年６月６日

渡部　秀之

（国土交通省　九州地方整備局　筑後川河川事務所）

報告のねらい

平成24年7月13日～14日の九州北部豪雨により、矢部川では堤防決壊を含めた堤防被災が18箇所で発生した。

本報告は、堤防決壊について、その後の土質調査や浸透流解析により明らかにした被災の要因や被災メカニズムを公表することにより、堤防決壊に関わる未解明事象解明の一助とする。

概要

被災メカニズムについて、以下の手順で推察した。

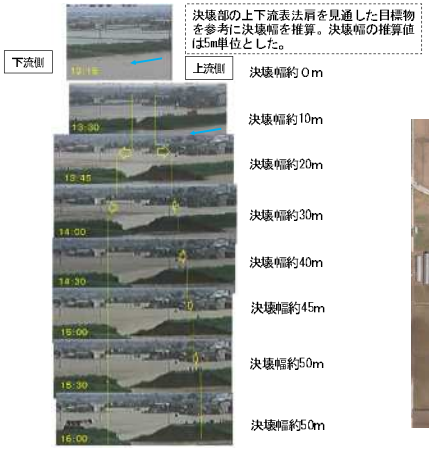
①外力となった降雨量、河川水位の状況。

②決壊箇所付近の地盤の土質構成の把握（空間的分布）。

③決壊箇所と決壊しなかった箇所の浸透流解析により、のり尻付近に作用する圧力水頭やG/Wの差異を明確化。

④堤防のり尻部の噴砂口をモデル化した浸透流解析による基礎地盤砂層内での浸透流速と土質調査から得られた砂層粒度分布より、砂層の空隙・空洞化進行の可能性を考察。

⑤以上の結果及び目撃証言等をもとに決壊メカニズムを推定。

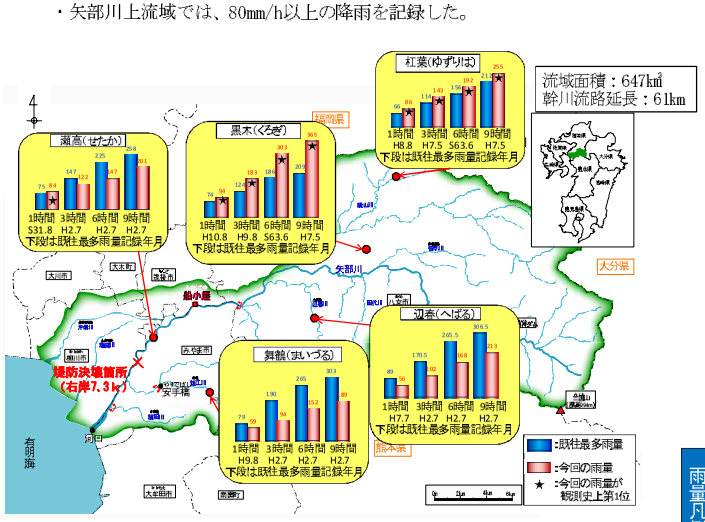


堤防決壊の進行（ＣＣＴＶ画像）

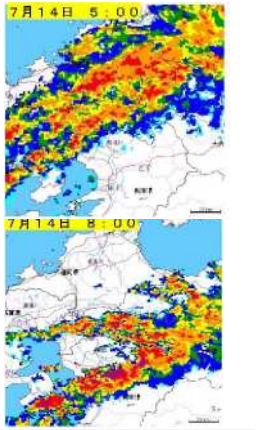
決壊箇所上流の土質（粘性土）

降雨量と降雨分布

・上流域にある黒木、杠葉の2観測所では、1,3,6,9時間降雨量で観測史上最大を記録した。
・矢部川上流域では、80mm/h以上の降雨を記録した。



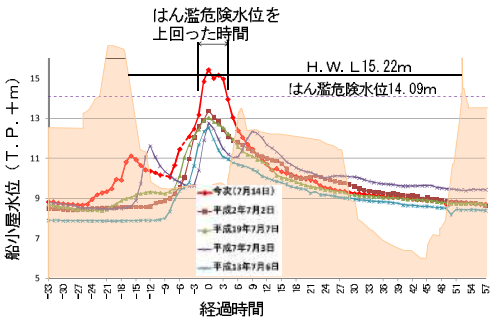
観測所における降雨量（既往最多雨量との比較）



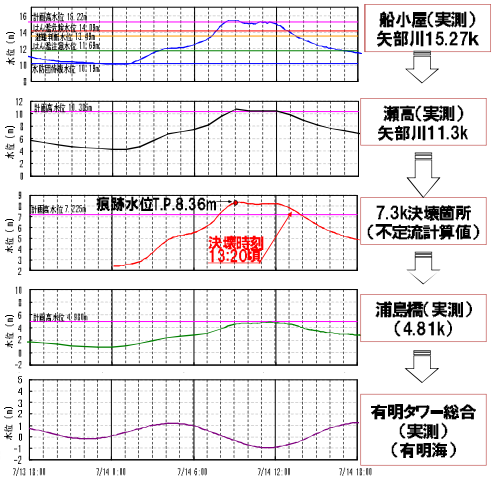
雨量レーダーによる降雨分布

矢部川における洪水時の河川水位

・船小屋観測所では、既往最大水位を約2m上回る観測史上最高水位を記録した。
・洪水は、5時間以上はん濫危険水位を上回った。
・決壊箇所付近の痕跡水位は、計画高水位（H.W.L）を約1m超えていた。
・不定流計算による水位波形より、決壊箇所では計画高水位以上の河川水位が5時間程度継続後、計画高水位（H.W.L）を上回っていたなかで決壊が生じた 。

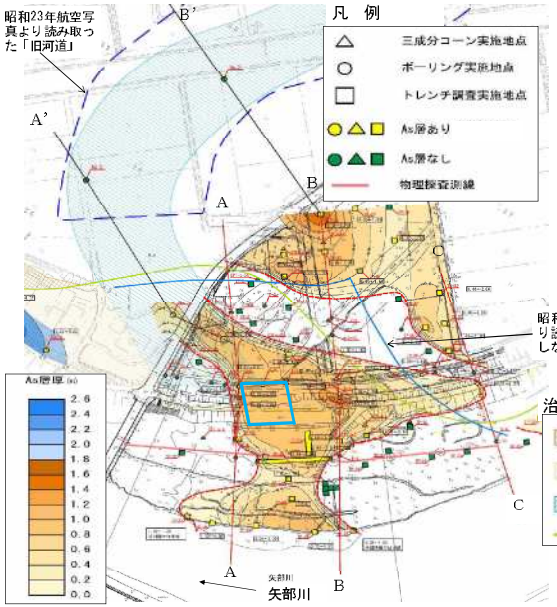


船小屋水位観測所における主要洪水の水位



7月13～14日矢部川水位ハイドログラフ

決壊箇所付近で実施した土質調査位置及びAs層厚分布

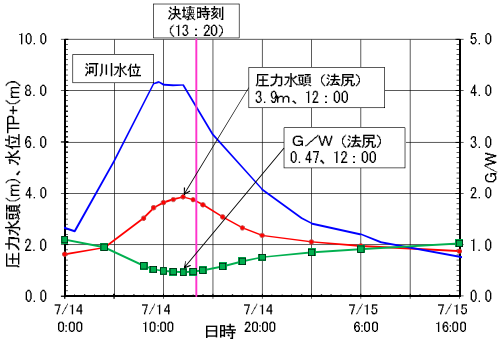


高水敷のトレンチ調査で確認された粒度の粗いAs層

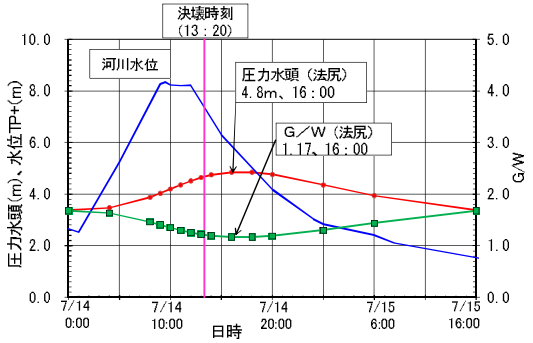
・堤防及び基礎地盤の土質構成や物性値を把握するため、決壊箇所を含む広範囲（高水敷～堤防～堤内地）に亘り土質調査を実施した。
・基礎地盤表層に砂層（As層）が存在し、河岸から堤防を横断して堤内地の途中まで分布していた。低水路河岸で広く高水敷の途中で狭まり、堤防付近で広がっている。
・As層の厚さは決壊口を挟む付近で比較的厚い。
・As層の分布と治水地形分類図に示す微地形との関係は不明瞭であり、当該As層は、河川氾濫により堆積した沖積砂と推定される。

浸透流解析結果

・B測線では河川水位の上昇とともにAs層への浸透が促進され、堤防裏のり尻付近で最大の圧力となる。最大圧力水頭は3.9m、最小のG/Wは0.47となり、盤ぶくれが生じる結果となる（ G/W ＜1.0）。
・無被災のC測線では、堤防を横断するAs層はなく、基礎地盤中位に分布するAg層が河岸から堤内地に連続する透水層となる。堤防のり尻部のAg層では最大圧力水頭は4.8mと大きいが、被覆土層の荷重より小さいため最小のG/Wは1.17であり、盤ぶくれは生じない結果となる。



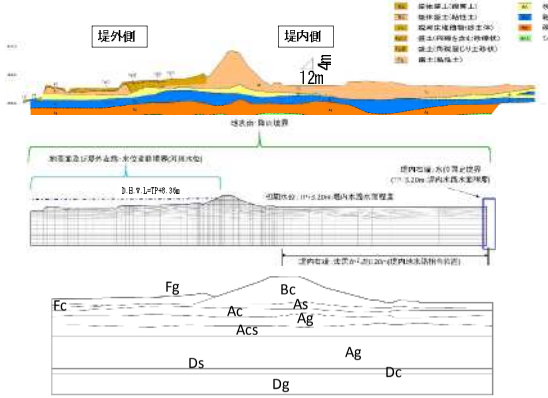
河川水位、圧力水頭及びG/Wの経時変化（B測線）



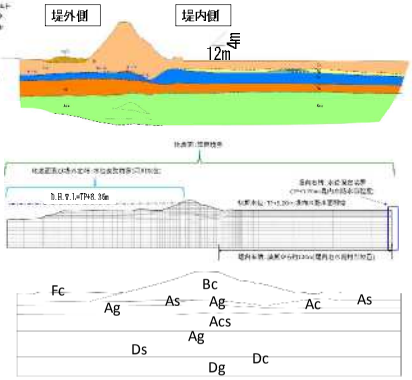
河川水位、圧力水頭及びG/Wの経時変化（C測線）

堤防の土質断面及び解析モデル図

・決壊箇所の代替と考えられるB測線では、基礎地盤上部のAs層は1～1.5mの厚さで分布し、Bc層とAc層に挟まれ、かつ河岸から堤内地まで堤防を横断する形で存在し、As層は行き止まりの状態である。
・無被災箇所のC測線では、B測線と異なり、堤防下及び高水敷にAs層は確認されていない。



B測線土質横断図と解析モデル



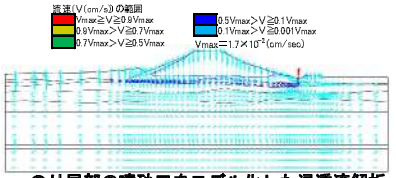
C測線土質横断図と解析モデル

解析に用いた透水係数

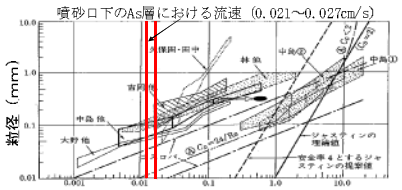
検討断面	堤体	基礎地盤			
	Bs	Fc	As	Ac	Ag
B測線断面	1.0×10^{-5}	1.8×10^{-5}	3.4×10^{-2}	4.5×10^{-6}	8.5×10^{-3}
C測線断面	1.9×10^{-5}	1.8×10^{-5}	6.4×10^{-3}	4.5×10^{-6}	8.5×10^{-3}
噴砂口モデル（B測線）	1.0×10^{-5}	1.8×10^{-5}	3.4×10^{-2}	4.5×10^{-6}	8.5×10^{-3}

※高水敷表層のFg層の透水係数は3.3×10^{-3}cm/s，噴砂口の透水係数は1.0×10^{-1}cm/sを設定した．また，堤体のせん断強度はc：21.1kN/m²，φ：7.3°である。

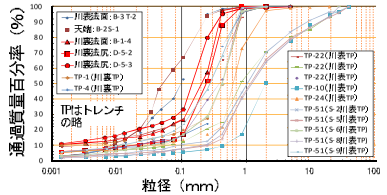
堤防決壊のメカニズム



のり尻部の噴砂口をモデル化した浸透流解析による流速図（7月14日10：00）

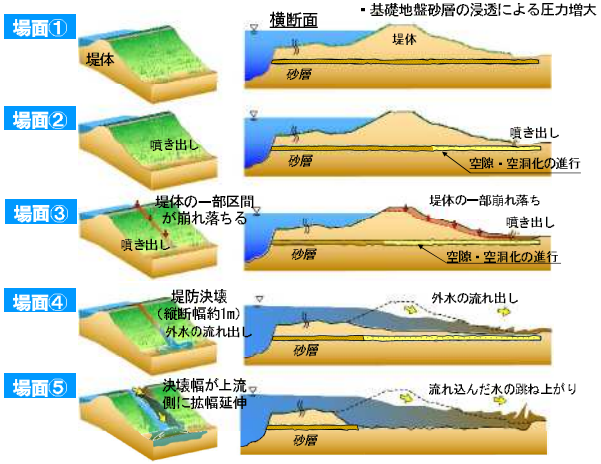


限界流速と粒径の関係



右岸7.3ｋ付近のAs層の粒度曲線

・のり尻部の噴砂口を高い透水性材料（K＝1.0×10^{-1}cm/s ）で設定したモデルでは、噴砂口直下のAs層流速が2.9～3.7×10^{-3}cm/sである（7/14の8時から14時）。これから間隙率（n＝0.2）を用いて実流速を推定すると、0.021～0.027cm/sであり、0.1mm程度の粒径の限界流速を超える。0.1mmはAs層の6～66%を包含する粒径に該当することから、As層の細粒分が噴砂口から流出し、時間とともにAs層の空隙・空洞化が進行したものと考えられる。

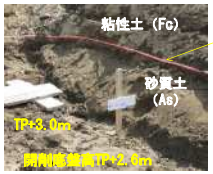


堤防決壊の経過概念図

決壊口の開削調査結果

・決壊箇所トレンチではAs層は流出し確認できなかったが、隣接する決壊箇所上流側トレンチではAc層の上部に1.8～1.9mの厚さでAs層が確認された。

確認開削調査位置図



（赤テープ上面）
As層とFc層の境界はTP＋3.6～3.7m

トレンチ
（決壊箇所）

トレンチ
（決壊箇所上流側）

2013年度河川技術に関するシンポジウム　OPS1堤防の浸透破壊

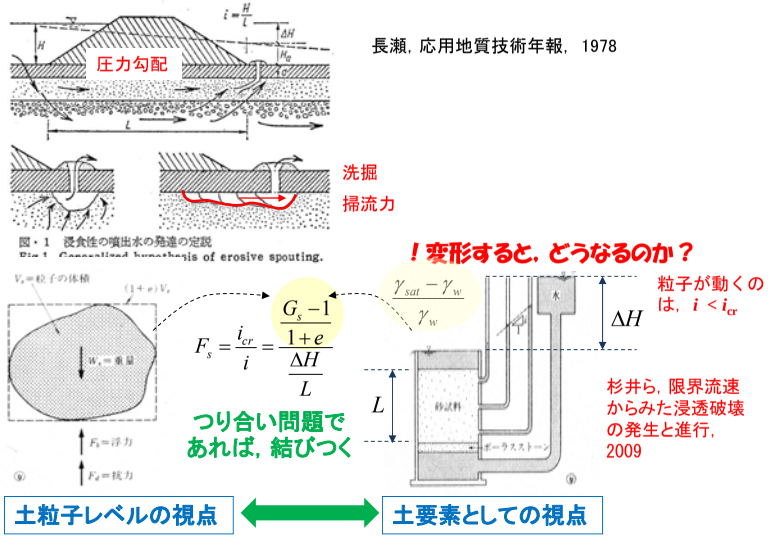
～目に見えない堤体･基盤内からの破壊～
より深い現象の理解と堤防管理の高度化を目指して
（2013.06.06）

地盤工学での浸透破壊の研究動向

名古屋工業大学　前田健一

構造体（堤体）レベル
構造体要素（部分）レベル
土の要素（土塊）レベル
土粒子レベル

浸透破壊を様々なスケールの視点で考察してみる



長瀬，応用地質技術年報，1978

土粒子～構造体としての視点

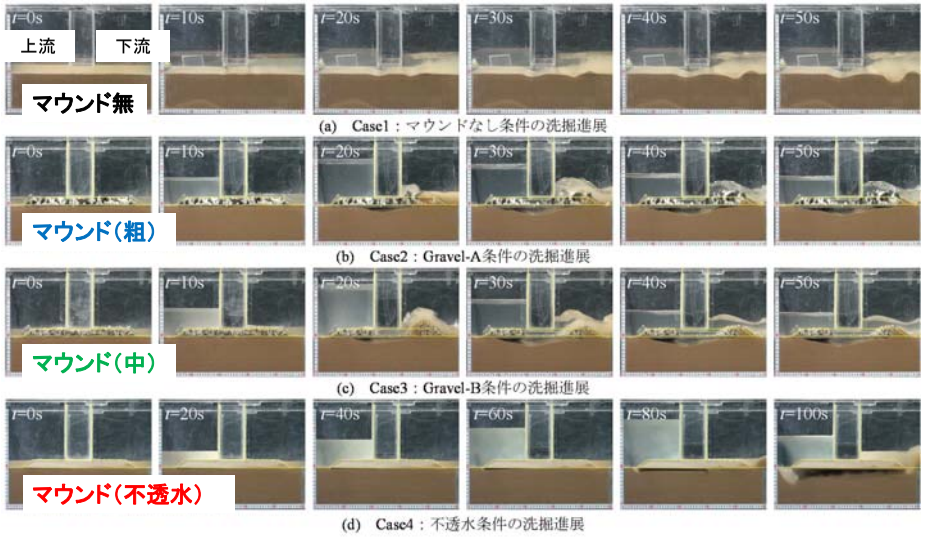
Surface flow -> seepage into slope , small piping

heavy rain 130-150 mm/*h*

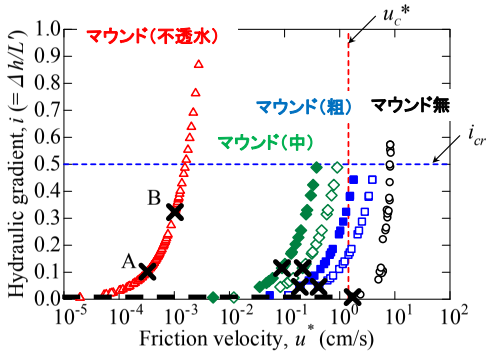
Piping: 最初はきれいな水の漏水⇒濁り⇒堤内から「ゴロゴロ」という音⇒大きな粒子が流失　⇒詰まり⇒滑り土塊の変位⇒濁った漏水の再開

亀裂とすべり（ただし破壊しない）

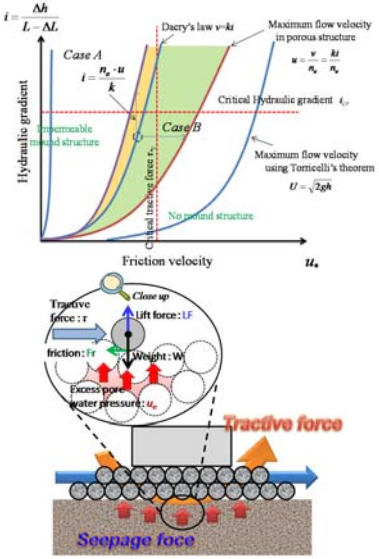
洗掘の進行



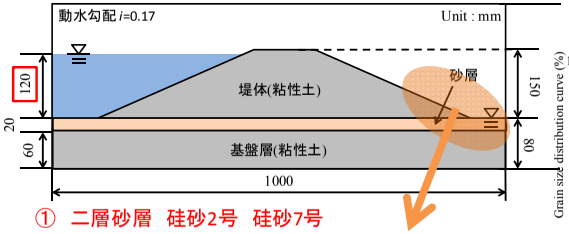
下の砂地盤に作用する掃流力：摩擦速度と（巨視的）動水勾配

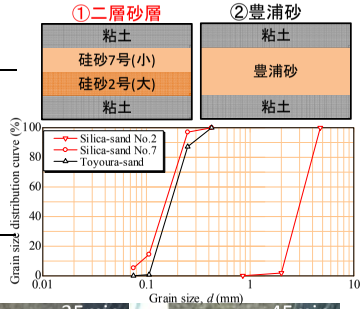


Case1 : No mound structure
Case2 : Gravel-A mound structure($u=ki$)
Case2 : Gravel-A mound structure($u=ki/n_e$)
Case3 : Gravel-B mound structure($u=ki$)
Case3 : Gravel-B mound structure($u=ki/n_e$)
Case4 : Impermeable mound structure
Start point of scouring soil



堤体模型実験の結果

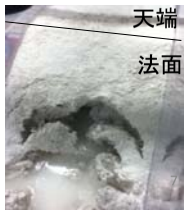




① 二層砂層　硅砂2号　硅砂7号

局所的な濁った漏水が切欠で、法先からの砂層・堤体を浸食.その後パイピングにより破堤.

② 豊浦砂　内部侵食しない豊浦砂では，漏水しても，堤体の法先に掘削しても破壊しない



微小な変形は見られるが、破堤には至らない.

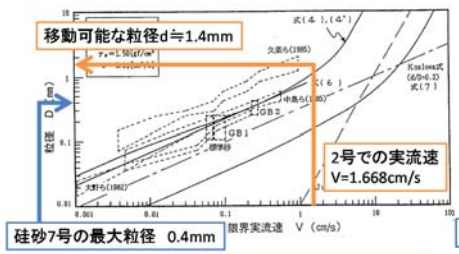
粒径Dと限界実流速Vの関係(堤体模型実験)

壊れた砂層
硅砂2号と7号の二層砂層

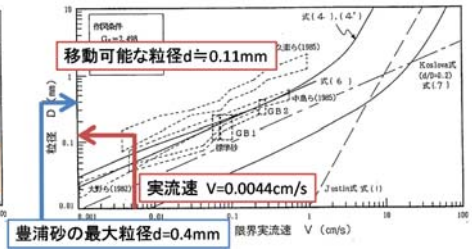
試料名	透水係数 (cm/s)	i=0.2における実流速(cm/s)	最大粒径 (mm)
硅砂2号	8.34	1.668	4.0
硅砂7号	4.38×10^{-3}		0.4

壊れない砂層
豊浦砂

試料名	透水係数 (cm/s)	i=0.2における実流速(cm/s)	最大粒径 (mm)
豊浦砂	2.2×10^{-2}	4.4×10^{-3}	0.4

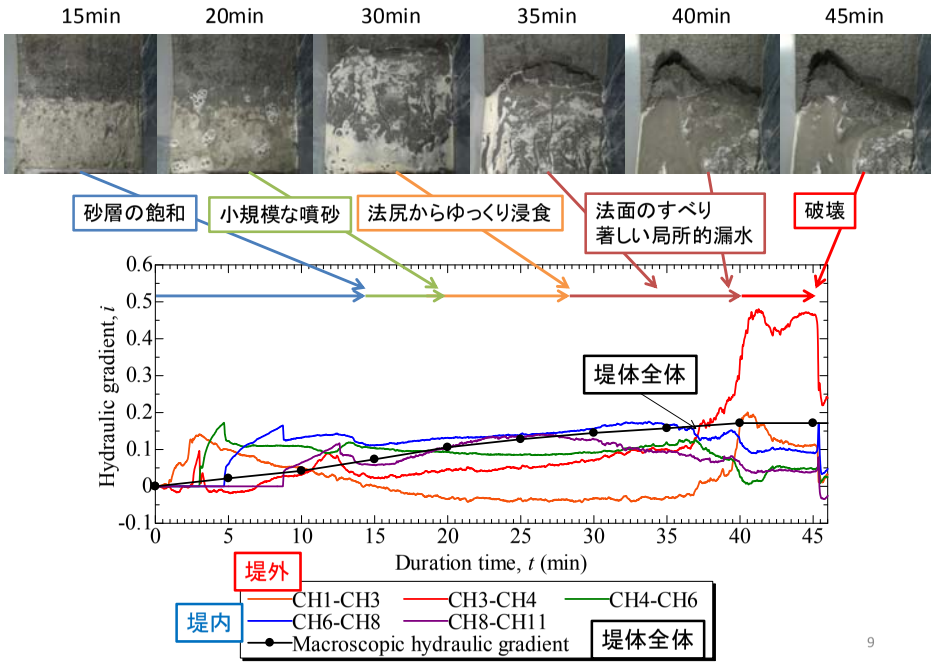


浸透流速 ＞ 最大粒径の限界流速



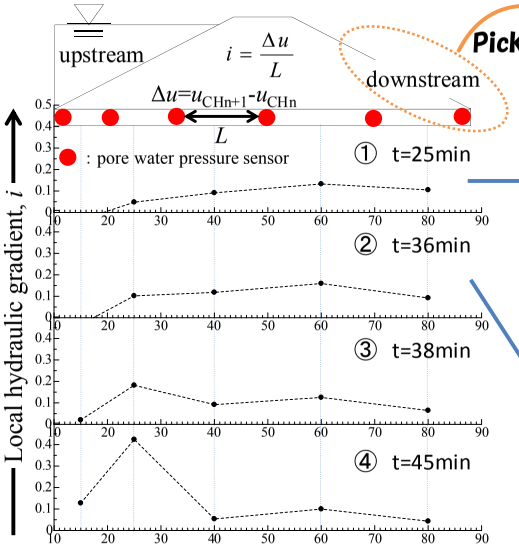
浸透流速 ＜ 最大粒径の限界流速

→ 粒径の揃った砂層は破壊しにくい.
粒径差が大きく、細かい砂の限界流速より速い浸透流速が破壊に至る必要条件.



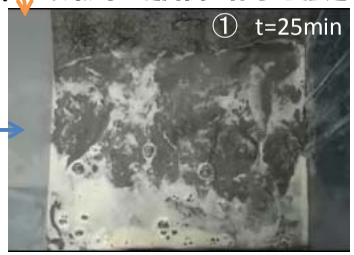
9

局所的(計測器間)動水勾配の変動

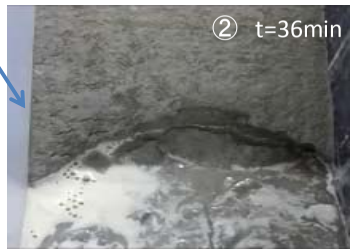


Pick up!

実験時の堤内側の様子(2倍速)



砂層からの浸透により徐々に浸食

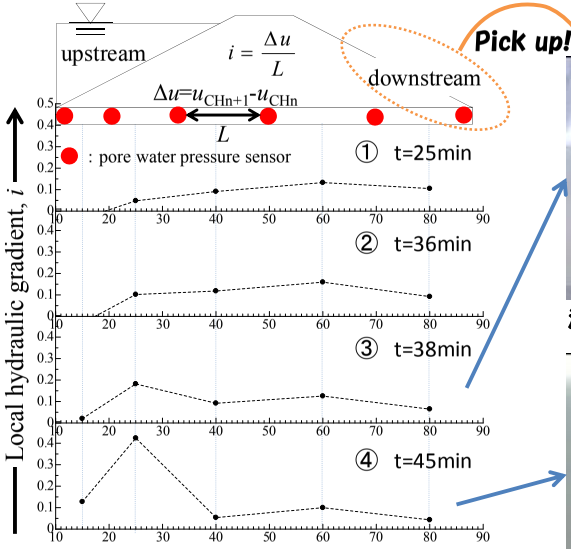


局所的な漏水の様子 (画像左側)

①, ②: 全体的に動水勾配が上昇。 砂層・堤体が徐々に浸食。 → 漏水が局所化。

173

局所的(計測器間)動水勾配の変動



Pick up!

実験時の堤内側の様子(2倍速)

漏水箇所の流量増加 法面の滑り

さらに流量増加 → 破堤に至る

③, ④: 堤外側の動水勾配が著しく上昇。
→漏水箇所の流量が増加 → 破堤

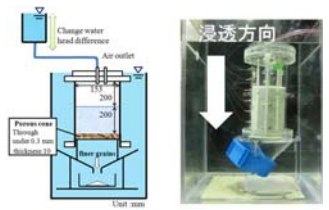
粒子レベル ～ 土要素レベル

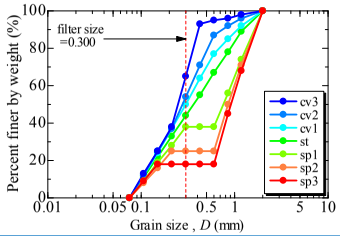
（粒度の大きさ，広さだけでなく，形状が重要）

12

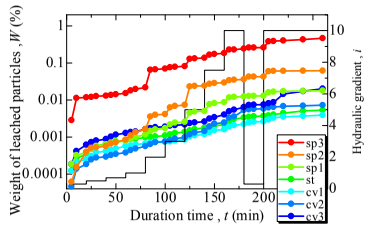
粒径混合分布の流出過程

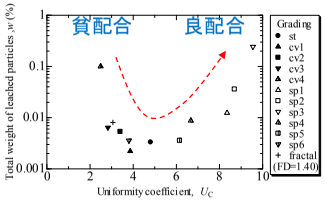
粒度分布





流出量の経時変化

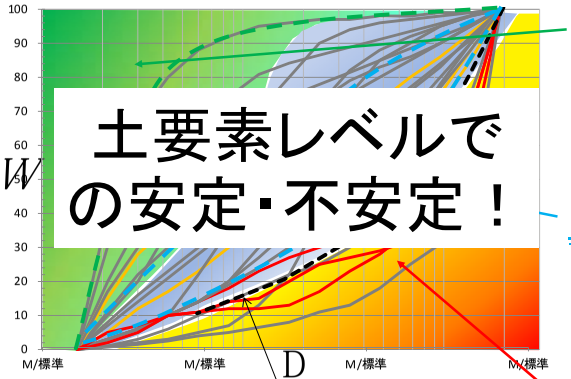




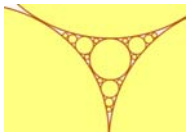
流出量：階段分布＞中間粒径過多≧直線分布

直線分布から離れるほど流出量増加，流出のスパイラル

内部浸食の判定境界



土要素レベルでの安定・不安定！



フラクタル粒度の例（フラクタル次元＝1）

(a) 内部浸食なし

粒度がそろっているので内部浸食しない（細粒分が土内部で移動できない）→境界からの流出は注意

(b) 内部浸食に安定な粒度

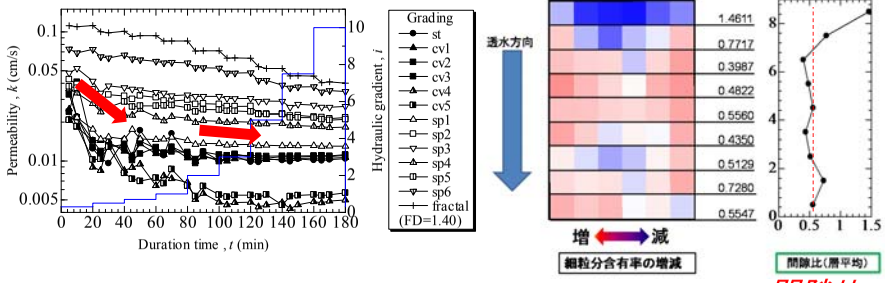
内部浸食量は少なく、連鎖的流出は発生しない

(c) 内部浸食に不安定な粒度

内部浸食量は多く、流出後の粒度形状もより浸食を受けやすい粒度形状⇒浸食の連鎖

流出だけでなく，目詰まりも大事？

透水係数

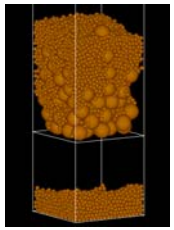


局所的な目詰りの発生

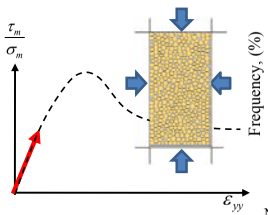
内部浸食 −土粒子流出による塑性変形を考慮した解析−

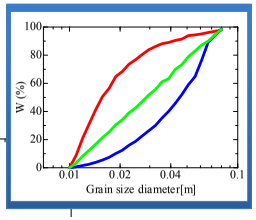
数値解析

個別要素法によるアプローチ



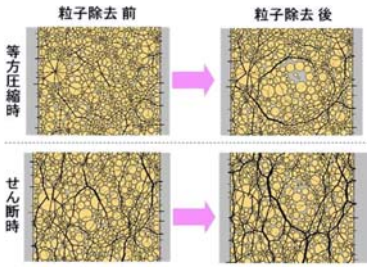
細粒分が粒状体内を移動可能な間隙径の頻度分布

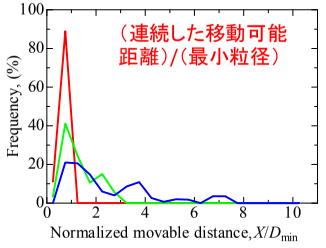




多くても全体の5%程度の間隙しか細粒分は移動できない。

（間隙径）/（最小粒径）

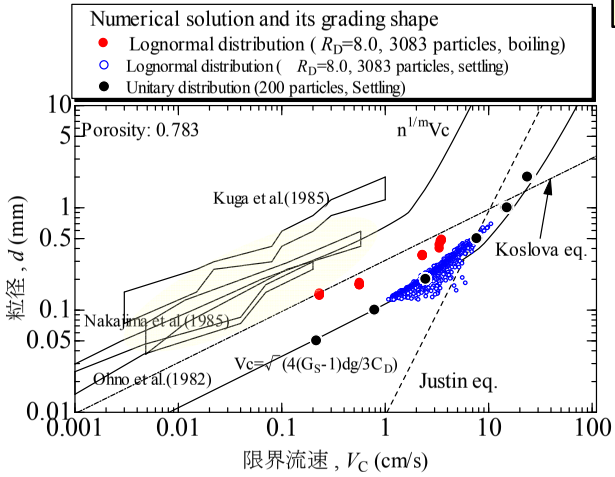


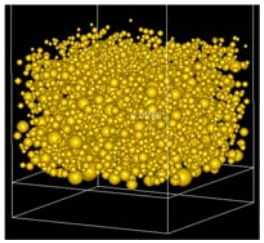


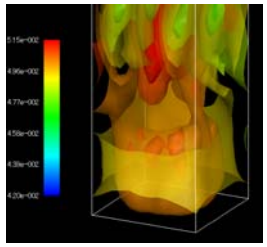
間隙比だけでなく，「繋がり」の拘束条件が重要！

粒子の限界流速

DEM＋CFD





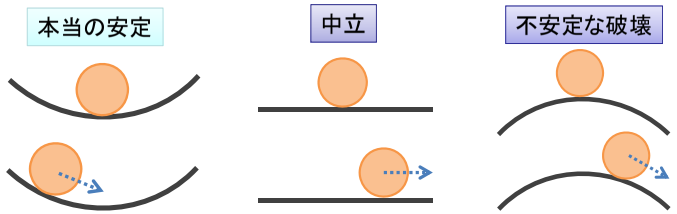


引用:山田謹吾, 杉井俊夫, 宇野尚雄; 粒子群の干渉効果を考慮した限界流速式の提案, 土木学会第44回年次学術講演会, pp.1050-1051, 1989

17

土要素レベル ～ 構造体要素

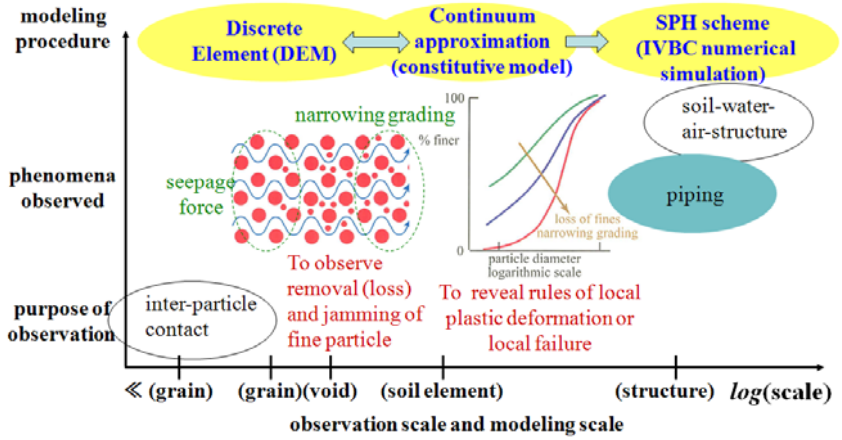
（安定，不安定）



18

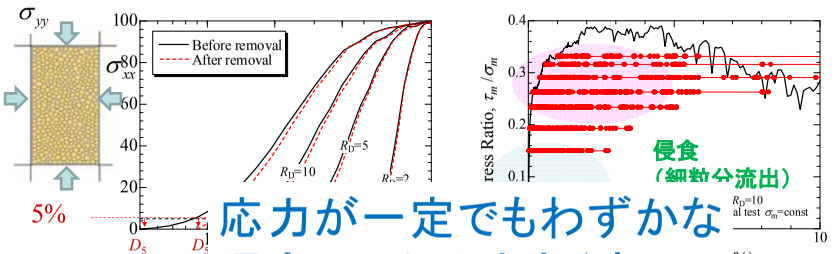
175

A trial study to solve internal erosion in multi-scale and multi-phase

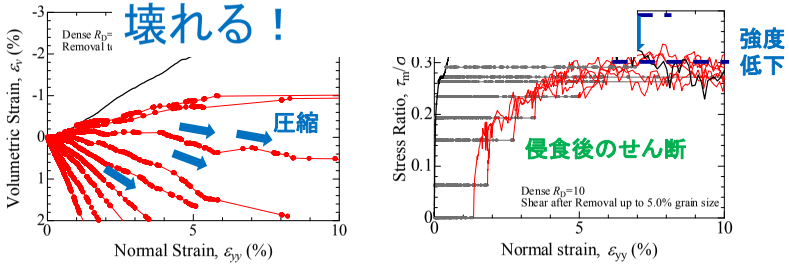


19

内部侵食に伴う変形・破壊挙動

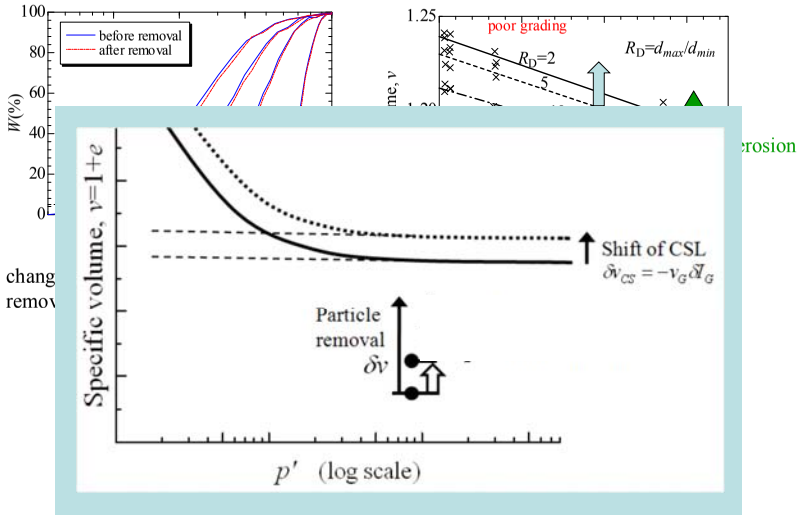


応力が一定でもわずかな浸食で，土は大きく変形し壊れる！



20

Modelling mechanical erosion soil mechanics with changing grading



D. M. Wood & K. Maeda: *Acta Geotechnica* (2007);
D. M. Wood, K. Maeda & E. Nukudani : *Geotechnique*, 60 (6) (2010)

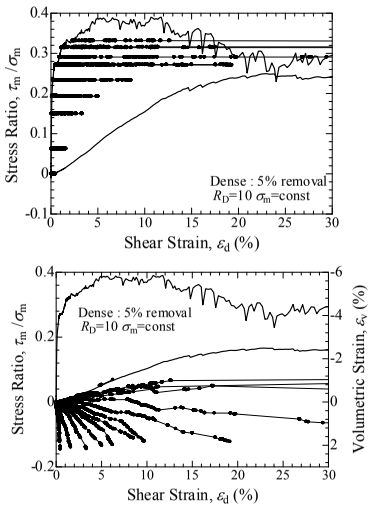
21

From previous 3 results, we made the continuum model.

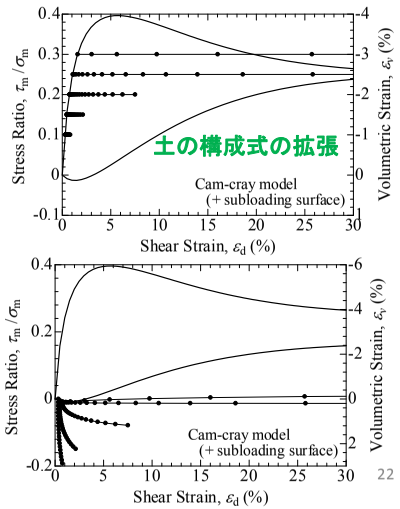
Performance of proposed model

DEM simulation results

DEMによる数値実験



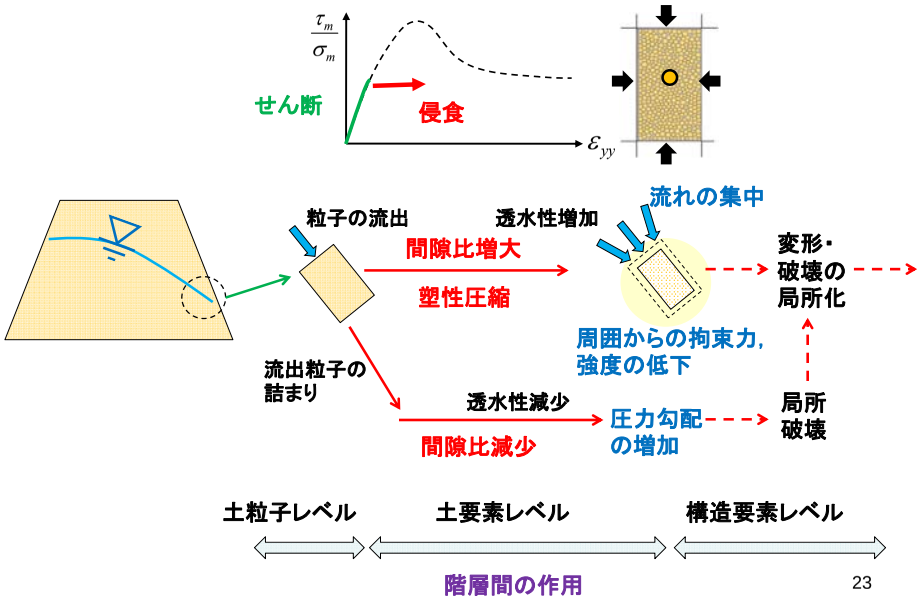
Proposed continuum model Including erosion effect



22

176

侵食による構造要素の局所変形の伝播



23

土粒子レベル～

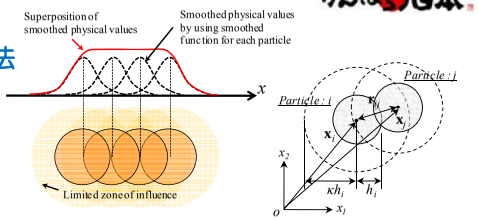
構造体要素 ～ 構造体レベル

24

数値解析手法の概要

SPH（Smoothed Particle Hydrodynamics）法

物理量を有した**質点**において（物理的），補間点（数学的）を持ち，場の**連続性**を表現している．
メッシュレスの性質があり，流動・崩壊等の第変形問題や相変化問題への適応が可能である．

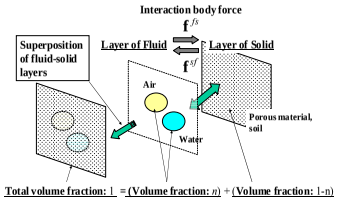


$$< f(\mathbf{x}) >= \int W(\mathbf{x}-\mathbf{x}', h) f(\mathbf{x}') d\mathbf{x}'$$

土水連成解析：相の重ね合わせ

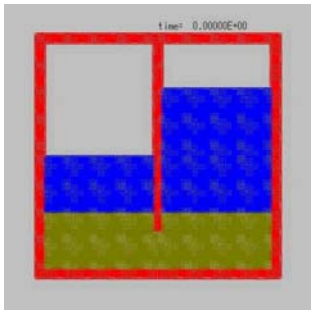
混合体理論

地盤を土粒子骨格と間隙流体からなる混合体と考え，**Darcy則**を適用したBiotの混合体理論を適用し，土水連成解析を行っている．



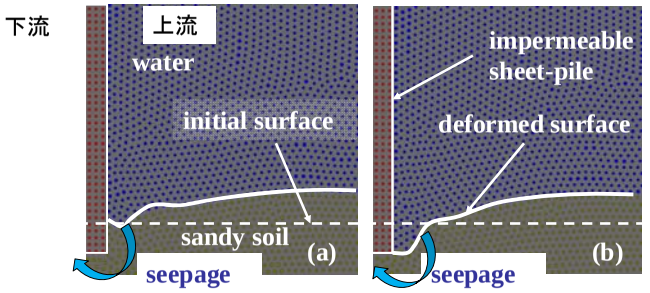
$$\mathbf{f}^{sf} = n^2 \frac{\rho_f g}{k}(\mathbf{v}^s - \mathbf{v}^f)$$

n：間隙率　　k：多孔質体の透水係数
g：重力加速度　　v^s：固体の速度
ρ_f：流体密度　　v^f：流体の速度

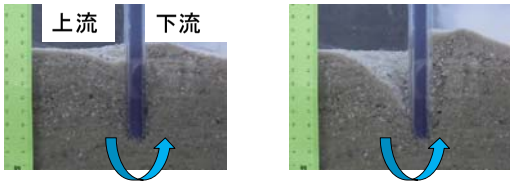


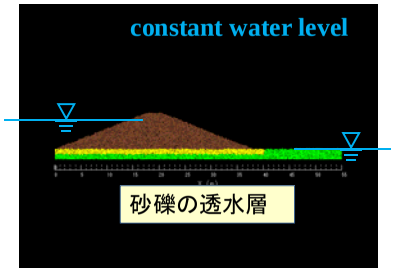
矢板周りの浸透解析

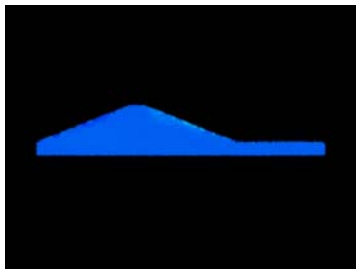
内部浸食の影響を入れると，局部的な変形に

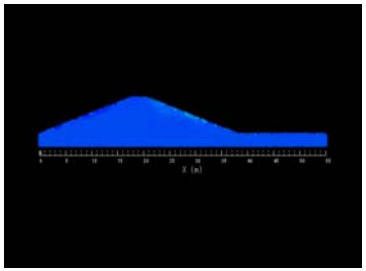


(a) 内部浸食なし; (b) 内部浸食あり

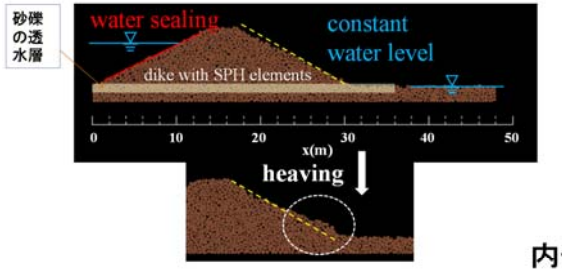




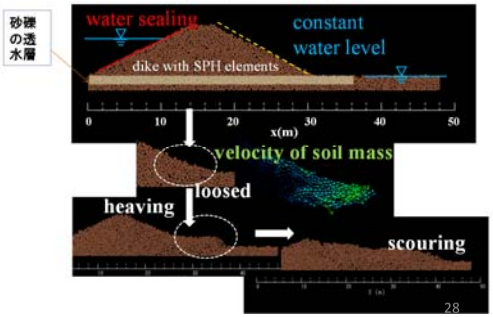




内部侵食の効果なし



内部侵食の効果あり



進行性破壊の理解に向けて

- パイピングの進行には，掃流（表面洗掘）・表面洗掘と内部侵食と目詰まり（圧力勾配の変動）が必要？
- 破壊の進行には，土粒子～土要素～構造要素～構造体（堤防）のループ作用が必要？
- 階層間を結ぶ力学モデル，数学モデルの必要性

  土粒子～土要素～構造要素～構造体（堤防）～？
- （地）粒度分布の形状を軽視していた？乱流は？
- （地）ゆるみと波長・波形を工夫した探査
- （水）土粒子レベル（極表面）－水の相互作用式

  OK！？　式は多いが，意外と多い実験パラメータ！！
- 破壊制御

  航空機の世界には想定外がない（壊れ方を決めている）

  破壊力学では，脆性破壊，延性破壊，強度の速度依存が明瞭

資料1-4

2013/06/06
2013年度河川技術に関するシンポジウムOPS1

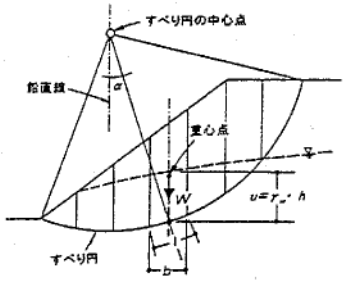
実験で捉えられた堤防の浸透破壊現象

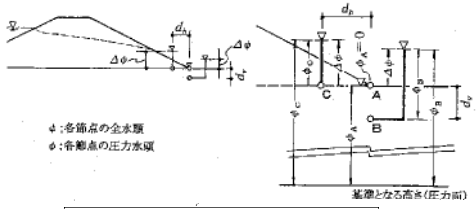
独立行政法人土木研究所
地質・地盤研究グループ
佐々木哲也

浸透に対する堤防の安全性照査

照査基準　基本断面形状を確保したうえで、以下の項目について照査

① 被覆土層なし

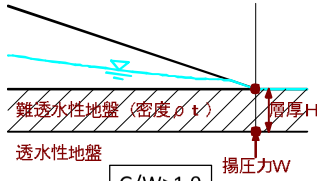




局所動水勾配の最大値:i＜0.5

② 被覆土層あり

表のり:Fs≧1.2×α1×α2
α1:築堤履歴の複雑さに対する割増し係数
α2:基礎地盤の複雑さに対する割増し係数
裏のり:Fs≧1.0



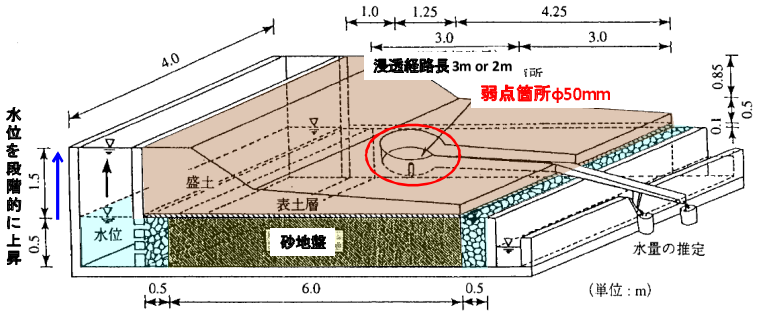
G/W>1.0

すべり破壊に対する安全性

パイピング破壊に対する安全性

パイピングに関する大型模型実験

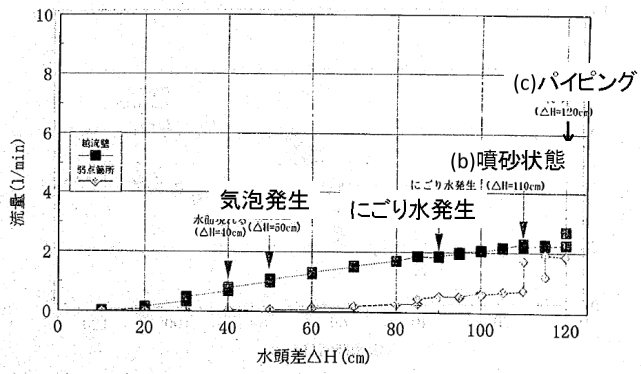
三木, 山田, 藤井, 野口:堤防基礎地盤のパイピング破壊基準に関する考察, 土木技術資料, 37-12, 1995.
三木, 山田, 藤井, 野口, 佐藤:堤防基礎地盤のパイピング破壊に関する模型実験, 土木研究所資料, 第3399号, 1996.



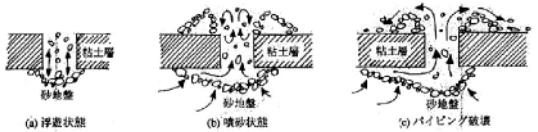
ケース	地盤使用砂	浸透経路長
15	霞ケ浦(美浦)	3m
16	鬼怒川	3m
17	利根川	3m
18	江戸川(シルト混じり)	3m
19	霞ケ浦(麻生1)	3m
20	玉造	3m
21	鬼怒川	3m
22	霞ケ浦(麻生2)	3m
23	利根川下流	2m
24	長良川	3m
25	霞ケ浦(西の州)	3m
26	江戸崎	2m
27	小貝川（吉沼）	2m
28	渡良瀬川	3m

比較的緩い砂を対象
D50:0.121~0.632mm
最大粒径:2~26.5mm
Fc:1~31%
Uc:2.05~40.93

パイピングに関する大型模型実験



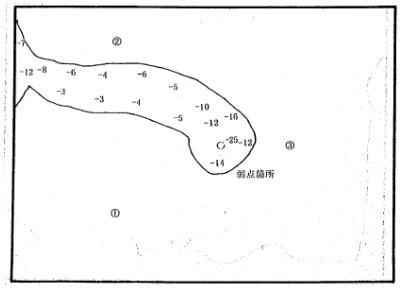
水頭差と流量の関係



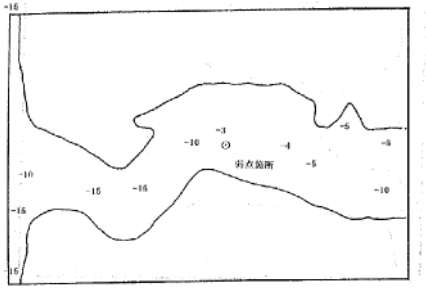
パイピングの進行状況の例

噴砂からパイピングに至るまでの水頭差が小さいケースが多い。実被害では？

パイピングに関する大型模型実験



ケース22

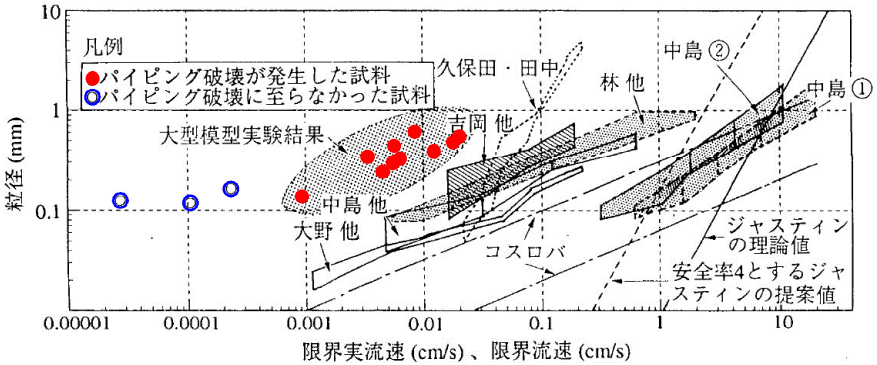


ケース17

実験後の水みちの観察状況の例

比較的均質な実験においても水みちは地盤の弱部（密度？粒度？拘束圧？）をねらって発達
実地盤ではもっと複雑？

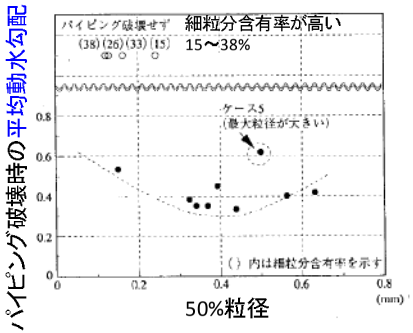
パイピングに関する大型模型実験



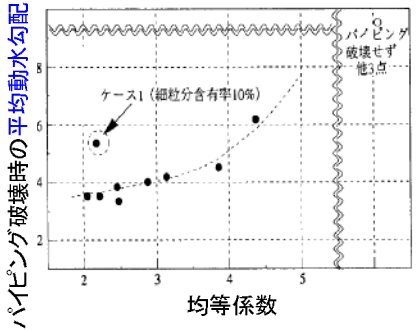
50%粒径と限界実流速の関係

実験の規模が大きくなることにより限界実流速はやや小さい
本実験では地盤の平均的な流れに着目しているため
（実務上局所的な流速の予測は困難）

パイピングに関する大型模型実験



50%粒径と平均動水勾配の関係

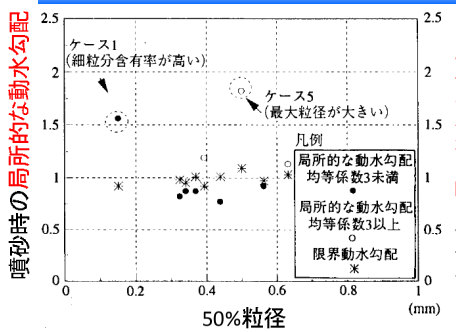


均等係数と平均動水勾配の関係

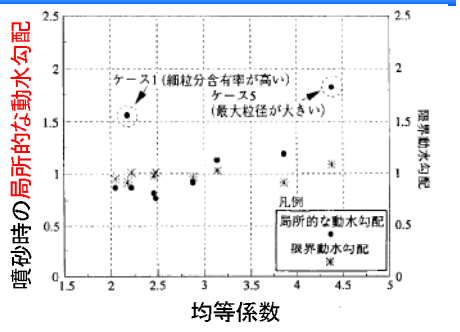
パイピング発生時の平均動水勾配

本実験のようなゆるい砂地盤では50%粒径0.3～0.4mm付近で、細粒分10%以下、均等係数5以下でパイピング破壊が発生しやすい。

パイピングに関する大型模型実験



50%粒径と局所動水勾配の関係



均等係数と局所動水勾配の関係

・局所動水勾配は非定常二次元浸透流解析より算出
・テルツァギーの限界動水勾配icも併記

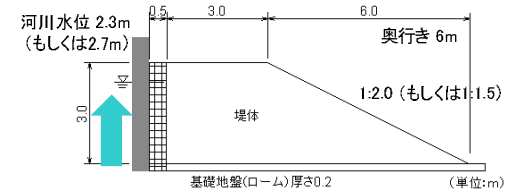
パイピング発生時の局所動水勾配

以下の条件で噴砂に至る
均等係数が3以下：局所的な動水勾配　0.7～0.9程度
均等係数が3より大きい：局所的な動水勾配　1.1～2程度
ただし、最大粒径が大きい場合や細粒分を10%程度含む場合を除く

細粒分を多く含む場合や礫を含む地盤、粒径幅の広い地盤等での評価に課題

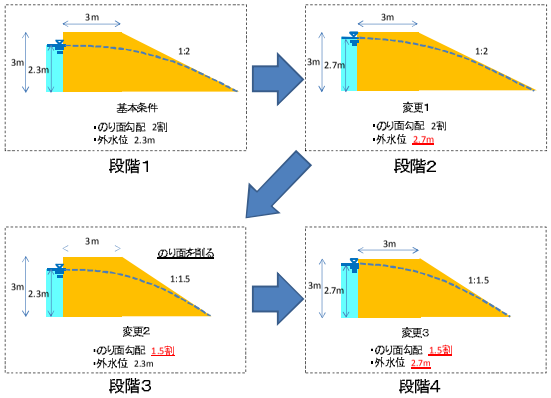
堤体の浸透破壊に関する大型模型実験

齋藤，森，佐々木：砂質土堤防の浸透による破壊形態と土質定数に関する大型模型実験，河川技術論文集，第17巻，2011年



模型の条件

Dc ＼ Fc	10%	30%	50%
85%	Case1	Case3	-
90%	Case2	Case4	Case5



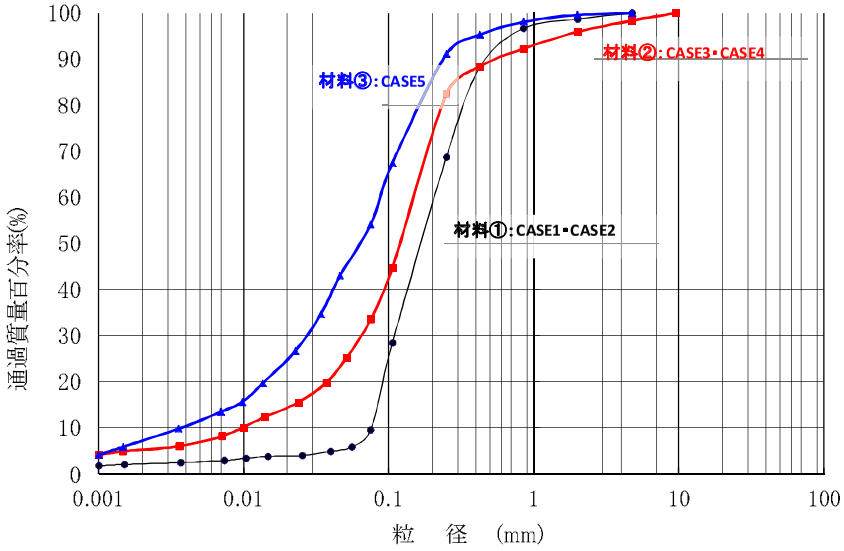
円弧すべり

Case4 Fc=30%, Dc=85%, 1:1.5

内部侵食

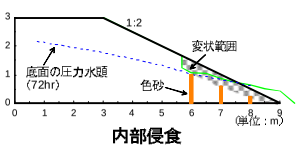
Case2 Fc=10%, Dc=90%, 1:2

堤防の浸透破壊に関する大型模型実験



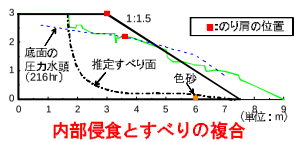
堤防の浸透破壊に関する大型模型実験

Fc10%, Dc90%, 勾配1:2（Case2）



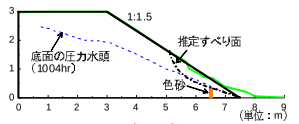
内部侵食

Fc30%, Dc85%, 勾配1:1.5（Case3）



内部侵食とすべりの複合

Fc50%, Dc90%, 勾配1:1.5（Case5）



すべり

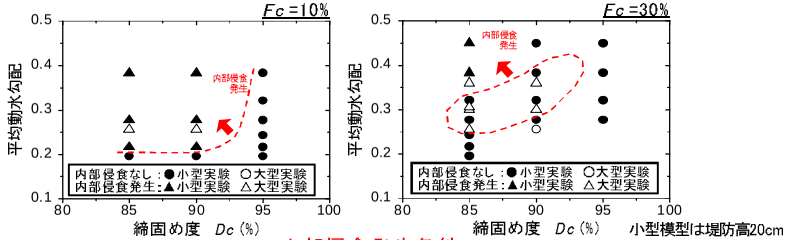
		Dc 85%	Dc 90%
Fc	10%	Case1 内部侵食	Case2 内部侵食
	30%	Case3 内部侵食とすべりの複合	Case4 内部侵食
	50%	-	Case5 すべり

模型堤防の崩壊形態として「内部侵食」「内部侵食とすべりの複合」「すべり」が観察
細粒分含有率が高い堤体材料、緩い締固め度の堤防ほどすべりが発生しやすい

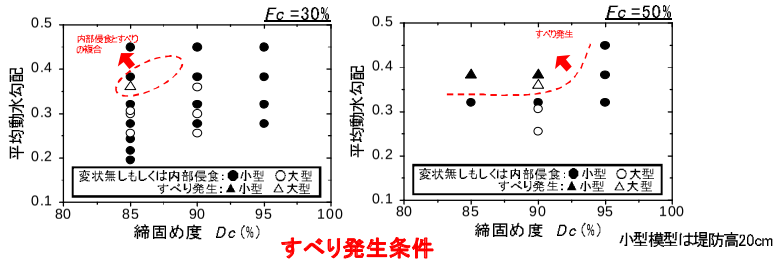
堤防の浸透破壊に関する大型模型実験

Fc10%, Dc85%, 勾配1:2（Case1）

堤防の浸透破壊に関する大型模型実験



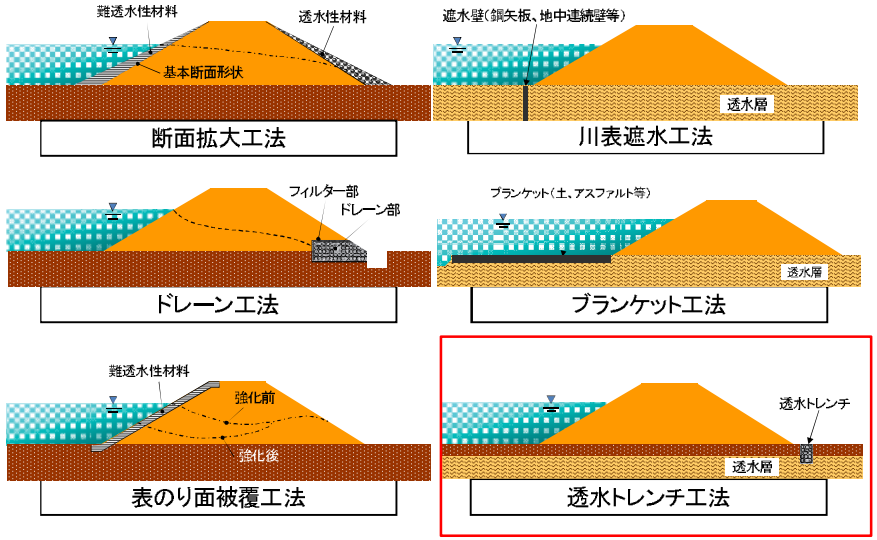
内部侵食発生条件



すべり発生条件

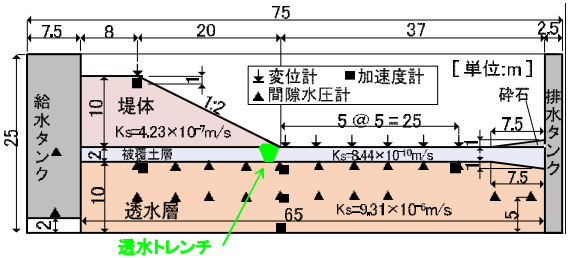
内部侵食は、Fc が低い堤体材料、緩い締固め度の堤防ほど発生し易い傾向
すべりは、*Fc* が高い堤体材料、緩い締固め度の堤防ほど発生し易い傾向

浸透に対する堤防強化工法の検討



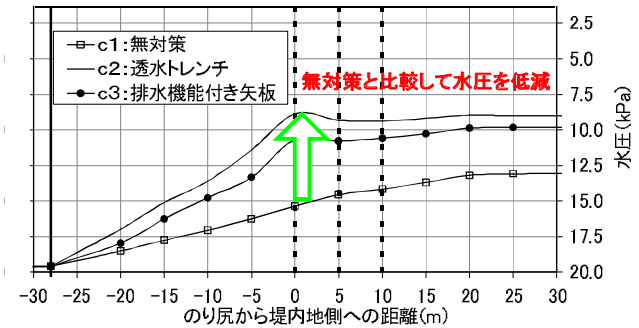
遠心模型実験による透水トレンチの検討

増山、齋藤、石原、佐々木：河川堤防の川裏側における揚圧力対策工に関する大型遠心模型実験，河川技術論文集，2012年



- 実寸土槽
- 幅1.5m
- 高さ0.5m
- 奥行0.3m

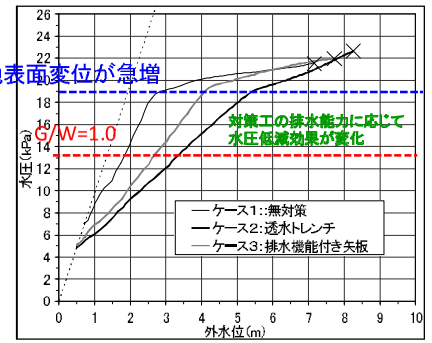
模型断面図



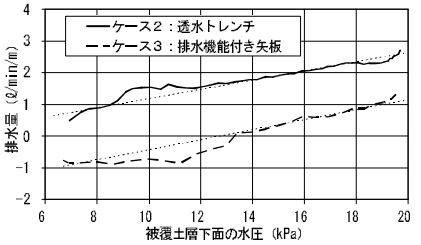
被覆土層下の水圧分布図

（外水位2m相当）

遠心模型実験による透水トレンチの検討



外水位と被覆土層下の水圧との関係



被覆土層下面に生じる水圧と排水量

透水トレンチによる被覆土層下の水圧低減効果は確認できたが，
・トレンチの排水能力を超えた場合の堤防の安全性は？トレンチ部が弱部となり被害を助長しないか？
・地盤調査等の不確実性，透水係数の推定精度等を踏まえて安全余裕をどの程度見込むべきか？あるいは適用可能な地盤条件は？

資料1-5

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

◆2013.2より開始、総勢20名、これまで2回開催。

◆「きっかけ」

- 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。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。

◆WG連携での取り組み

- 過去の浸透破壊の典型的な見方にとらわれず、各人が見てきた様々な現象を改めて収集整理する。現場で起こっていることをより的確に理解していく。
- 以上は基礎的なことであるが、実際の堤防管理、補強などにも十分に役立つ知見となり得る。
- そこで、現在の一般的な浸透破壊の考え方に基づいて、種々の対策や維持管理が行われているが、改めて収集整理で見い出した新たな現象、進行過程、機構（モデル）から再検討し、今後の技術開発の方向性について意見をとりまとめる。

1

第2回会議での議論

- 種々の現象について、どのように理解・認識しているのかを各メンバーが意見を出し合い、出された意見を全員で共有し、その状況をまずありのままに整理
- A4一枚に下記事項について記載した資料を持ち寄った
  - 1.「実事例，実物大実験，模型実験」名（寸法は必須）
    - 現地での実事例，実物大実験，模型実験（あまり小さくない），数値解析結果、文献・会議など何かで見て聴いて気になっている話、など幅広く対象
  - 2. どんなメカニズムでそれが起きたと理解されているのか，自分はどう考えるのか．（←どのようなスケール感でも結構です．粒子，間隙，土塊，堤防鉛直断面，河川横断断面，河川縦断・横断断面）
  - 3. それらを予測，評価することは可能か，どんな方法があるのか，それらの問題点，課題は．
    - 各メンバーの観点・立場・経験などを反映した「本当に感じている」「ステレオタイプにとらわれてない」多種多様な意見を集めることを重視
    - 普段から気になっていることなどをざっくばらんに記載
- 19枚の意見収集→ざっと整理すると….

2

183

4つの切り口からの意見集約

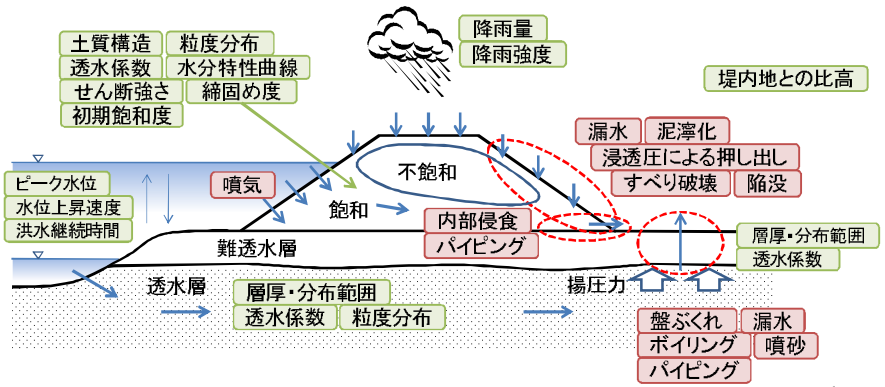
本OPSではここに焦点

- 降雨・河川水の堤防・基礎地盤への浸透 → 現象を変えうる種々の要因とその再現計算の工夫
- 変状の形態 → 浸透破壊の多様な発生形態・プロセス、および円弧すべりに代表されるのり面崩壊現象との区分・共存
- 変状の発達（脆性・延性と進行性破壊） → 破堤に至る現象とそうならない現象の違い、見分け方、現象表記（式）、評価
- データの情報化（現象解明と危険の事前察知） → 点検・モニタリング手法、蓄積したデータ分析のさらなる工夫

3

変状の形態 (1)
浸透破壊の多様な発生形態・プロセス
円弧すべりなどのり面崩壊現象との区分・共存

浸透破壊に伴う諸現象と主な影響要因



4

変状の形態 (2)
浸透破壊の多様な発生形態・プロセス
円弧すべりなどのり面崩壊現象との区分・共存

◆のり面の崩壊現象に関する課題
- 大規模模型実験により、堤体土質等に応じて崩壊形態が異なることが確認されているが、その条件は明確になっていない。
- 浸透に対する安全性は、正しく評価できているか？

◆基礎地盤で発生するボイリングやパイピングに関する課題
- なぜパイピングが進行するか？　流速だけでは説明できない（試算ではパイピング孔の中で砂を流送するだけの流速は生じない）。
- 浸透流下での土粒子の移動限界を動水勾配で考えるか、流速で考えるか？
- 漏水やボイリングを生じる可能性がある場所をどのようにして見つけだすか？
- 当たりをつけるための一次診断の技術が必要である。洪水履歴の分析も重要。
- 今後、被災や実験の事例を収集し、観測事実にもとづいた考察が必要である。

◆内部侵食に関する課題
- 浸透流によって土の内部から細粒分が流出して、間隙の増大、空洞化、局部崩壊などを生じたと考えられる事例が確認されているが、発生する条件や状態変化の詳細はわかっていない。

◆その他
- 現場では、これらの現象が共存（複合）して発生している可能性が高い。
- 現場で確認されるエアブローに関して、堤体の安全性に及ぼす影響は？

変状の発達：脆性・延性と進行性破壊
破堤に至る現象とそうならない
現象の違い、見分け方、現象表記（式）、評価

◆進行性破壊に関する課題
- 模型実験では、局部的な破壊に留まるケースと、破壊が進行して大規模崩壊に至るケースがある。これらを分ける条件は何か。
- 現状では、進行性破壊を扱える解析手法はない。どのような理論や解析手法を導入すれば、経時的な破壊形態の変化や進行速度を予測できるか。
- 破壊の進行性を考慮した安全性評価や対策の優先順位付け等は可能か。

今後の活動予定

- 浸透破壊に関する既往の知見を整理して、今後取り組むべき研究の課題と方向性について検討する。

<u>研究課題の例</u>
- 浸透に係る各種現象の検証と統一的解釈
- 浸透破壊の発生限界に関する実験的検討
- 破壊に至るプロセス及びメカニズムの解明
- 進行性破壊を扱うことが可能な数値解析手法の開発
- 地盤のモデル化技術
- 縦断方向の弱点箇所抽出技術

以上

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

河川部会堤防ワーキンググループ （代表：服部 敦）
堤防研究小委員会侵食,浸透破壊,洗掘ワーキンググループ（代表：前田健一）

狙い：パイピングのテクニカル・レビュー

◆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一般的な見方

★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言いがたい

パイピング関連技術の洗い直し

新たな知見・技術を踏まえて堤防管理の高度化に繋げていく

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辛くも破堤を免れている区間があった．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 多数のボーリング調査を行った結果，被災箇所付近の限られた範囲に砂層が存在していた．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的に行うのは困難

③ 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．

連携WGで検討

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

◆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～進展を記述する進行性破壊モデル

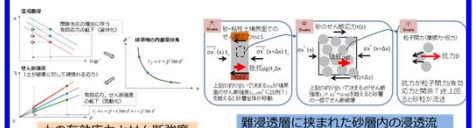
それを優先的補強のための破堤するかどうか「判別する技術」に繋げていくには・・・

□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）浸透層内の土の挙動のとらえ方



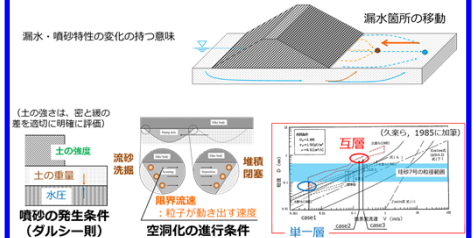
土の有効応力とせん断強度

難浸透層に挟まれた砂層内の浸透流と力のつり合い

流れ構造，せん断強度（有効応力）と水圧・抗力
せん断破壊，粒子の抜け落ち… → 強度の変化

□ 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？
⇒ 「判断する技術」

（2）パイピング進行に関わる素過程の抽出

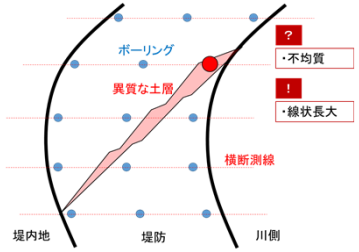


◆教訓・課題②

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

精緻な力学モデルが得られたとしても･･･



ボーリングによる現状以上の高密度点データの取得は現実的に困難
点データと物理探査の併用による空間データへの補完は精度に課題
↓
高精度な空間的に密なデータの取得は困難
↓
現状では不均質かつ疎なデータ

多様な切り口からの試み

【提防挙動調査から間接的に土質を推定】
【要注意地形，埋設構造物による定性的な状態把握】
【航空LP，UAV，MMS等による堤防形状を用いた性能調査】
【地盤内流速・含水率・水位等の連続観測による地盤特性の逆推定】
【統計的な危険度評価と信頼性解析による危険箇所のスクリーニング】

一例）河川近傍砂礫層の透水性と河川伏流水の流動特性に関する考察（松本）

◆教訓・課題③

状態監視のみでは危険箇所の特定は不可

・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

（1）被災・変状履歴の記録の徹底

被災履歴と浸透に関する変状の発生位置

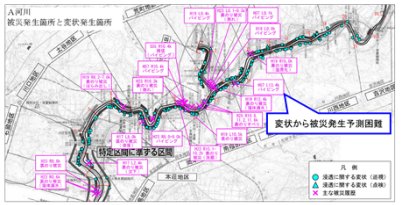


図 被災履歴と巡視点検により発見される変状の位置

（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

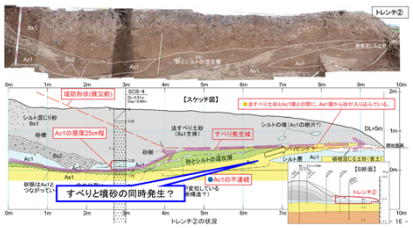


図 子吉川堤防被災における開削調査結果

出水中の堤防の挙動の測定

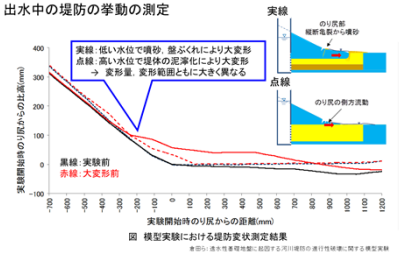
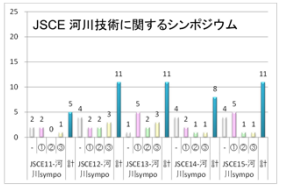


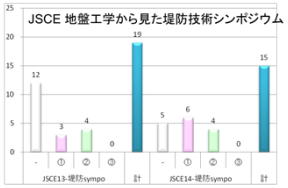
図 模型実験における堤防変状測定結果

（3）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

まとめ

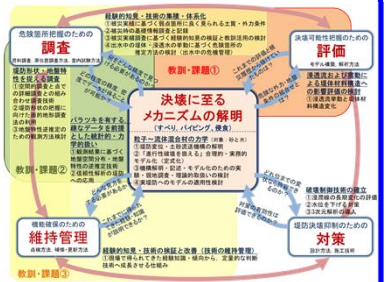
各教訓・課題に関する発表論文数





◆教訓・課題①に関わる研究に比べ、②、③は少ない

堤防破壊現象の解明とその対策に関するアカデミック・リサーチ・マップ
～教訓・課題が実務にどう活かされるか？～



◆根幹的な知見・技術である教訓・課題①の検討は言わずもがな大事

◆ただし，教訓・課題②，③も克服することが現場の技術としては重要であることの再認識と検討の深化

◆各成果を結びつける体系化（実践での鍛え上げ）も大事な検討

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的に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で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府環境創生部門　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ないかが見えてくる。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いった議論があった（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

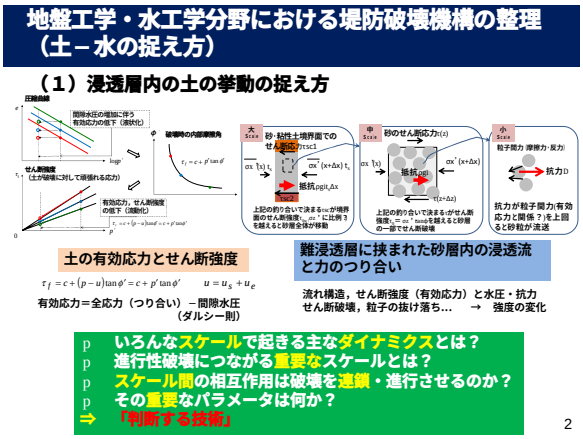
1. 外力シナリオと地盤特性の組み合わせ
- 今まで耐えていた；　一気に破壊
- （豪雨），高水位とその継続時間
- 現象（パイピング，すべり.....）の複合化←（別々の照査）
- 進行性破壊による破壊の大規模化によるリスクの増大
- 見逃している，分かったような気になっている地盤要因？）
(ex)旧河道は弱部と言われているがなぜ？

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

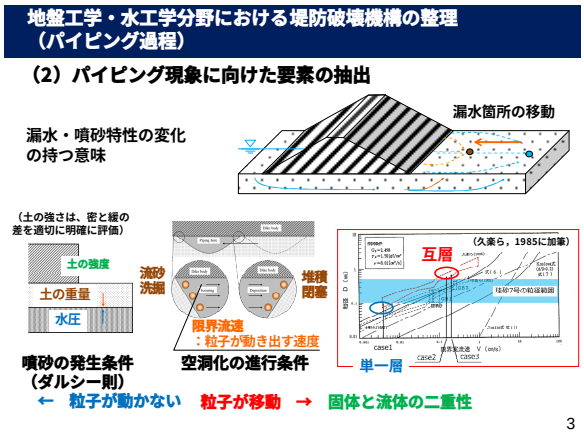
1

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）。

スライド-6



スライド-7



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。

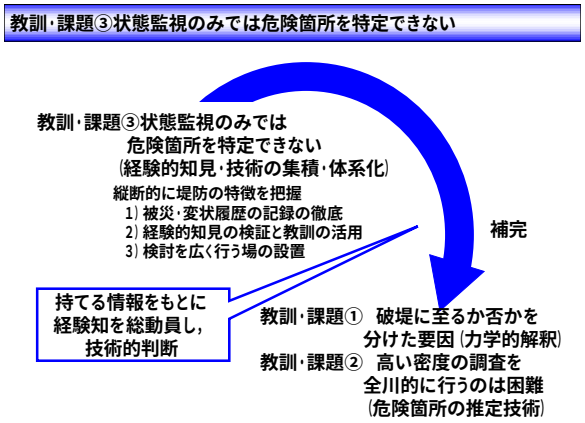
○教訓・課題②への取組み　　群馬大学　松本健作

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。

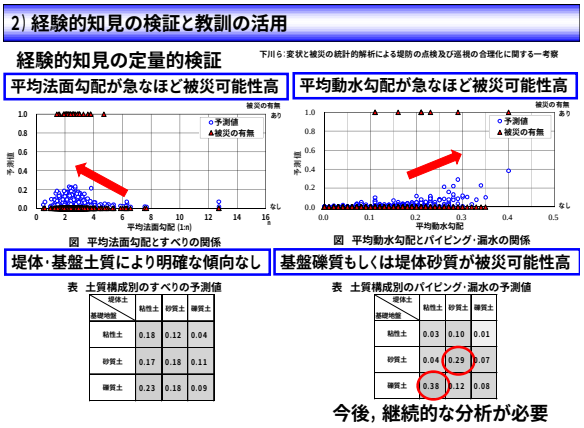
○教訓・課題③への取組み　　国土交通省・国土技術政策総合研究所　森　啓年

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、縦断的にど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



スライド-9



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

図 子吉川堤防被災における開削調査結果

中川博朗：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

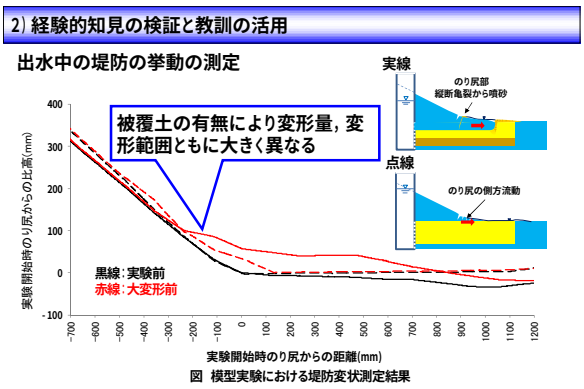


図 模型実験における堤防変状測定結果

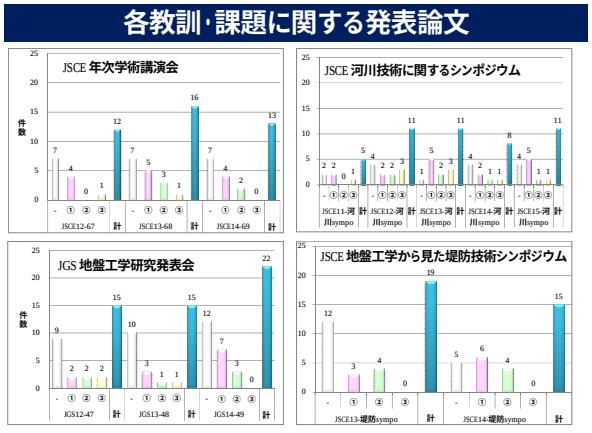
今後，さらなる危険箇所推定技術の検討が必要

○まとめ　　名城大学　溝口敦子，　建設技術研究所　李　圭太

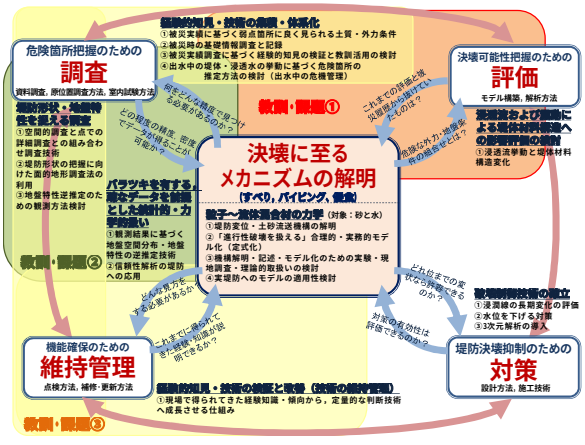
３つの教訓・課題に対応して、過去の発表論文数の傾向について整理した。教訓・課題①のメカニズムについては研究段階の発表論文が比較的多いが、教訓・課題②の調査に関する論文はあまり多くない。また、課題③の経験的判断や維持管理に関する発表論文は少ない状況にある（スライド-12 参照）。

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



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。

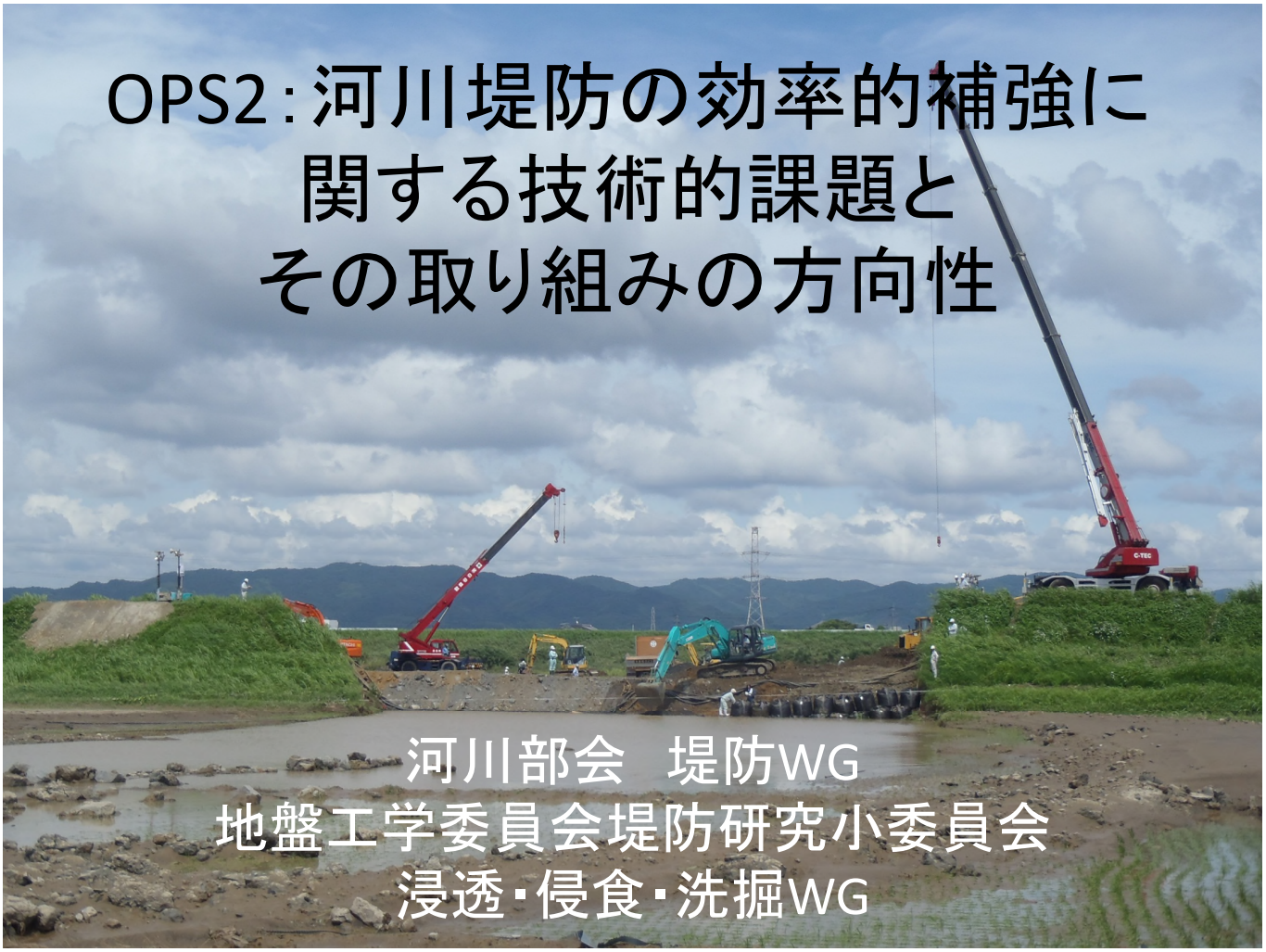
・避難勧告の助言のタイミング等の判断において、巡視だけでは間に合わない実態をサポートする知見を目指していただきたい。

・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ない。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。



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

河川部会　堤防WG
地盤工学委員会堤防研究小委員会
浸透・侵食・洗掘WG

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」

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的に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で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．

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府環境創生部門　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

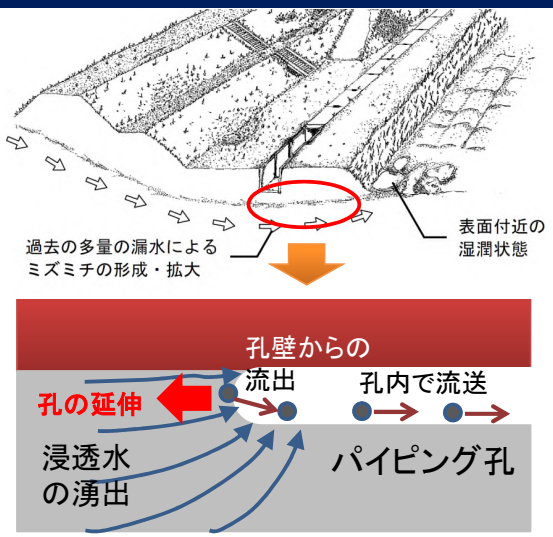
2.4　まとめ
溝口敦子：名城大学社会基盤デザイン工学科　准教授

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

パイピングのテクニカル・レビュー

◆浸透に対する堤防弱部の点検、安定性照査、浸透対策といった**種々の対応について検討する際の基本的な現象理解「パイピング」**

◆**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**、一般的にもそうした認識で議論することが多い。



★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。

「パイピング」関連技術の洗い直し

新たな知見・技術を踏まえて堤防管理の高度化に繋げていく

検討のアプローチ

【事例を下敷きにした議論】

現場の事例。業務で見てきたこと。実験で見たこと。

実務ベースから：単にマニュアルの羅列でなく、その運用で加味した「工夫」
徹底的な被災事例調査

研究ベースから：現象の捉え方、力学的取り扱い

【水工学と地盤工学の文化（慣用化した考え方）交流】

例えば、「地表面上での流送量と収支（地表形状の変化）」と
「地表下の構造体としての強度・変位」

連携WGの進め方

①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

②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

「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：破堤に至るか否かを分ける要因

1. 外力シナリオと地盤特性の組み合わせ

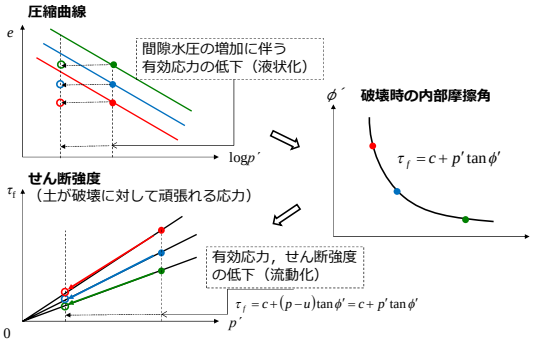
- 今まで耐えていた；　一気に破壊
- （豪雨），高水位とその継続時間
- 現象（パイピング，すべり.....）の複合化←（別々の照査）
- 進行性破壊による破壊の大規模化によるリスクの増大
- 見逃している，分かったような気になっている地盤要因？）
  （ex)旧河道は弱部と言われているがなぜ？

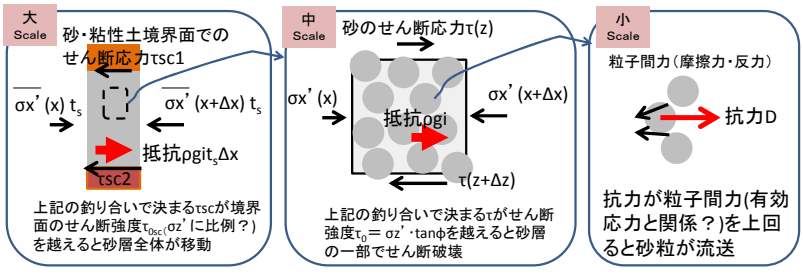
2. 優先的補強のための破堤するかどうか「判別する技術」

- **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

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





土の有効応力とせん断強度

$$\tau_f = c + (p-u)\tan\phi' = c + p'\tan\phi' \qquad u = u_s + u_e$$

有効応力＝全応力（つり合い）－間隙水圧
（ダルシー則）

難浸透層に挟まれた砂層内の浸透流と力のつり合い

流れ構造，せん断強度（有効応力）と水圧・抗力
せん断破壊，粒子の抜け落ち…　→　強度の変化

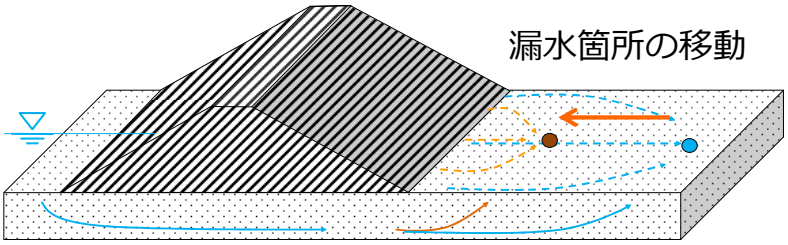
- **いろんなスケールで起きる主なダイナミクスとは？**
- **進行性破壊につながる重要なスケールとは？**
- **スケール間の相互作用は破壊を連鎖・進行させるのか？**
- **その重要なパラメータは何か？**

⇒ **「判断する技術」**

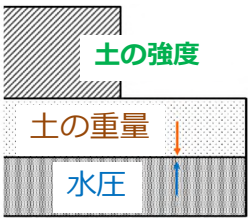
地盤工学・水工学分野における堤防破壊機構の整理（パイピング過程）

（2）パイピング現象に向けた要素の抽出

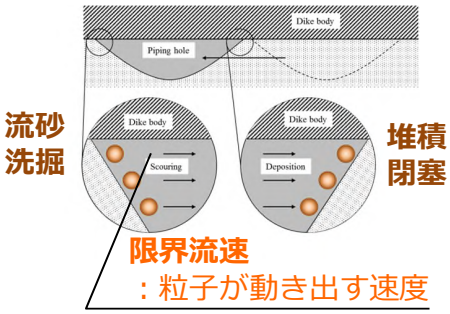
漏水・噴砂特性の変化の持つ意味



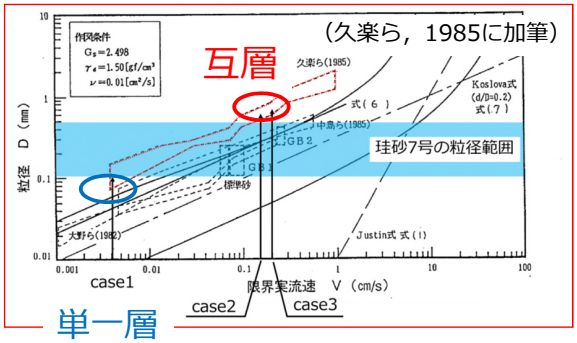
（土の強さは、密と緩の差を適切に明確に評価）



噴砂の発生条件（ダルシー則）

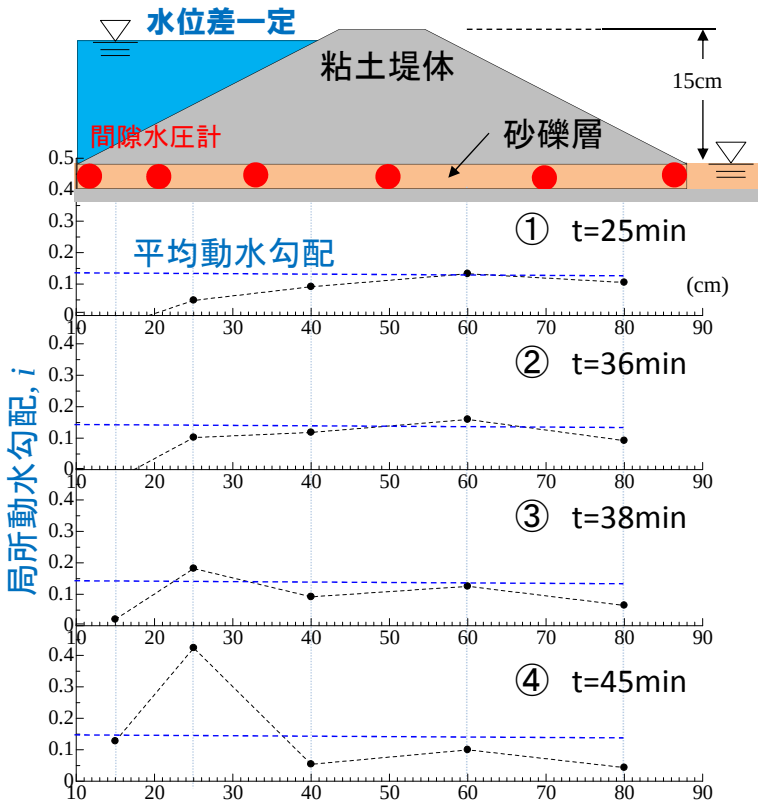


空洞化の進行条件

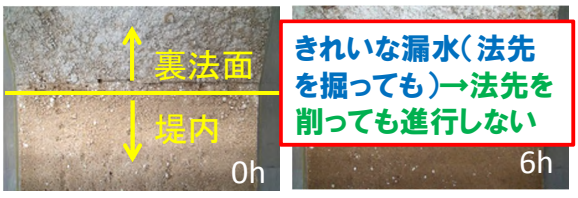


← 粒子が動かない　粒子が移動 → 固体と流体の二重性

透水性基盤を有する堤防の漏水と変状：基盤層の層構造の重要性

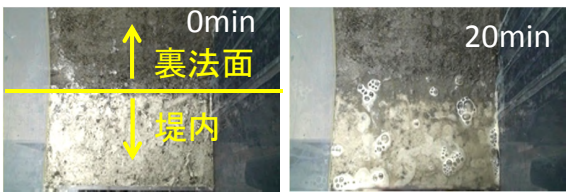


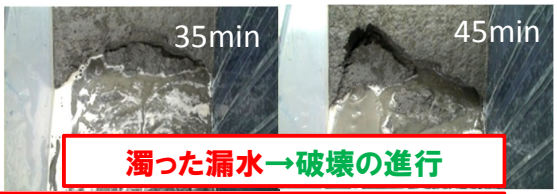
砂礫層が豊浦砂の場合



きれいな漏水（法先を掘っても）→法先を削っても進行しない

砂礫層が上細砂（上層）と砂礫（下層）の場合





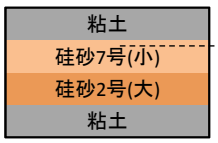
濁った漏水→破壊の進行

浸食，法の崩落，陥没，すべりの連鎖

パイピング照査への提案：動水勾配だけでなく粒径と限界実流速が必要

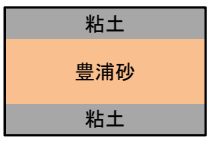
パイピング破壊発生

硅砂2号と7号の二層砂層



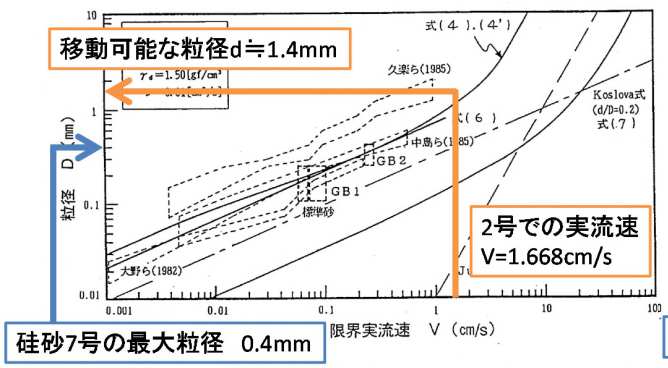
パイピング破壊なし

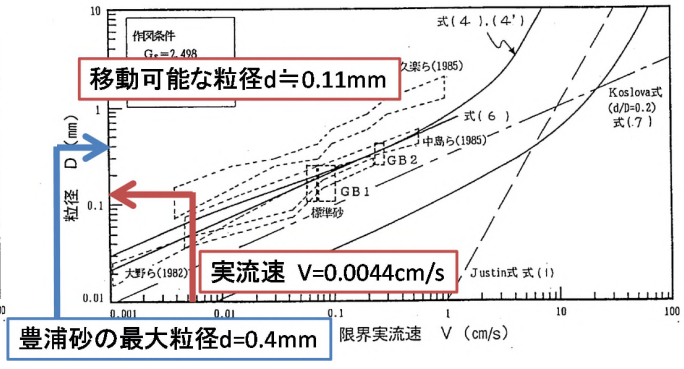
豊浦砂



試料名	透水係数 (cm/s)	i=0.2における実流速(cm/s)	最大粒径 (mm)
硅砂2号	8.34	1.668	4.0
硅砂7号	4.38×10^{-3}		0.4

試料名	透水係数 (cm/s)	i=0.2における実流速(cm/s)	最大粒径 (mm)
豊浦砂	2.2×10^{-2}	4.4×10^{-3}	0.4





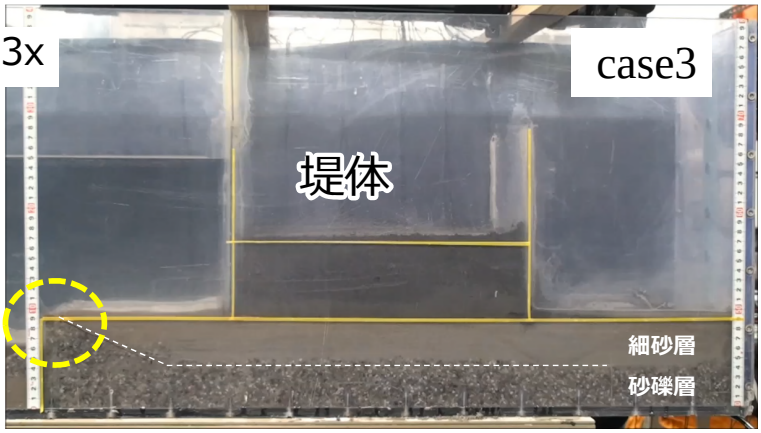
浸透流速 ＞ 最大粒径の限界流速

浸透流速 ＜ 最大粒径の限界流速

→ **粒径の揃った均質な単一基盤層は破壊しにくい.**

透水性にコントラストのある層状基盤層がパイピング破壊する：圧力の伝播と流速

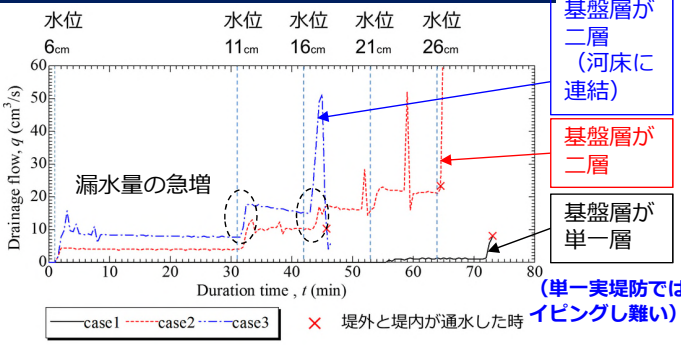
透水性基盤の層構造，土質と漏水，パイピング特性



噴砂の三次元的発生条件，変状の進展条件の検討が必要

case3

漏水量管理の重要性とポイントの整理

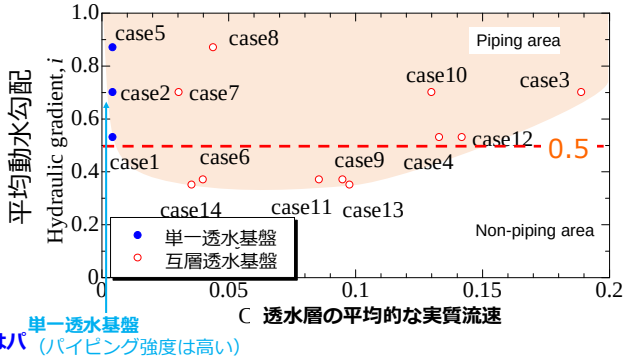


基盤層が二層（河床に連結）

基盤層が二層

基盤層が単一層

× 堤外と堤内が通水した時



単一透水基盤（パイピング強度は高い）

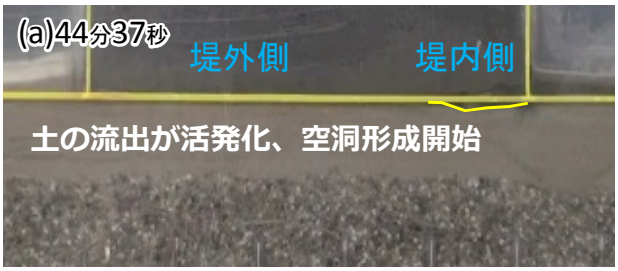
（単一実堤防ではパイピングし難い）

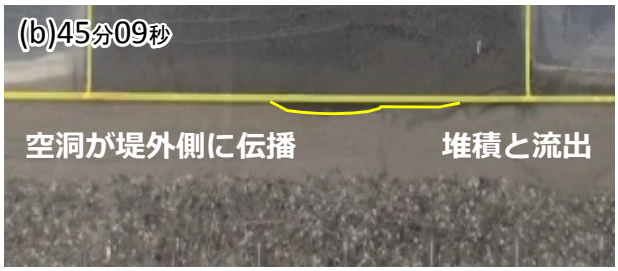
動水勾配だけでなく限界流速でも評価が必要

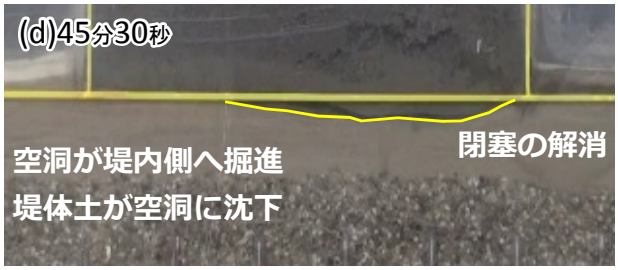
重要な点検，調査ポイント

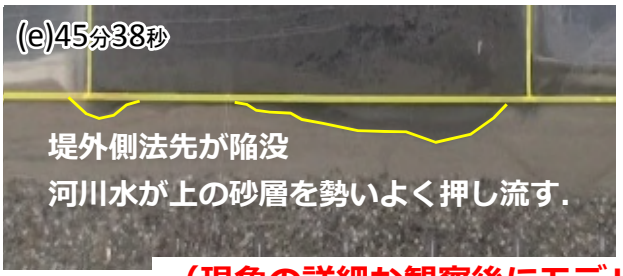
変状発生の条件と変状の発展の条件の蓄積に向けて

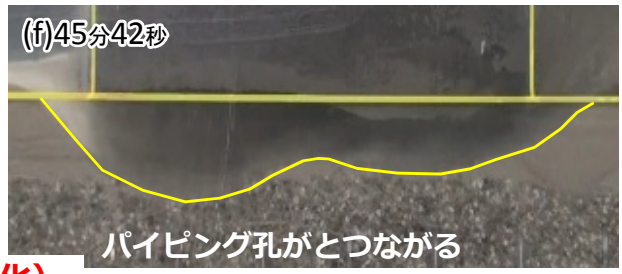
パイピングの発達：　固体と流体の二重性







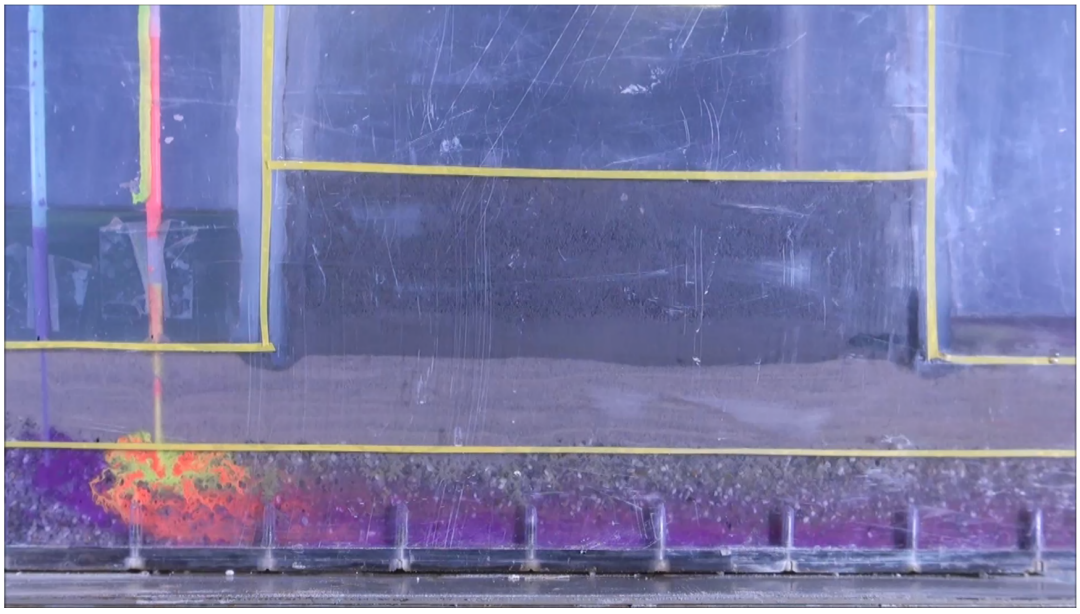




（現象の詳細な観察後にモデル化）

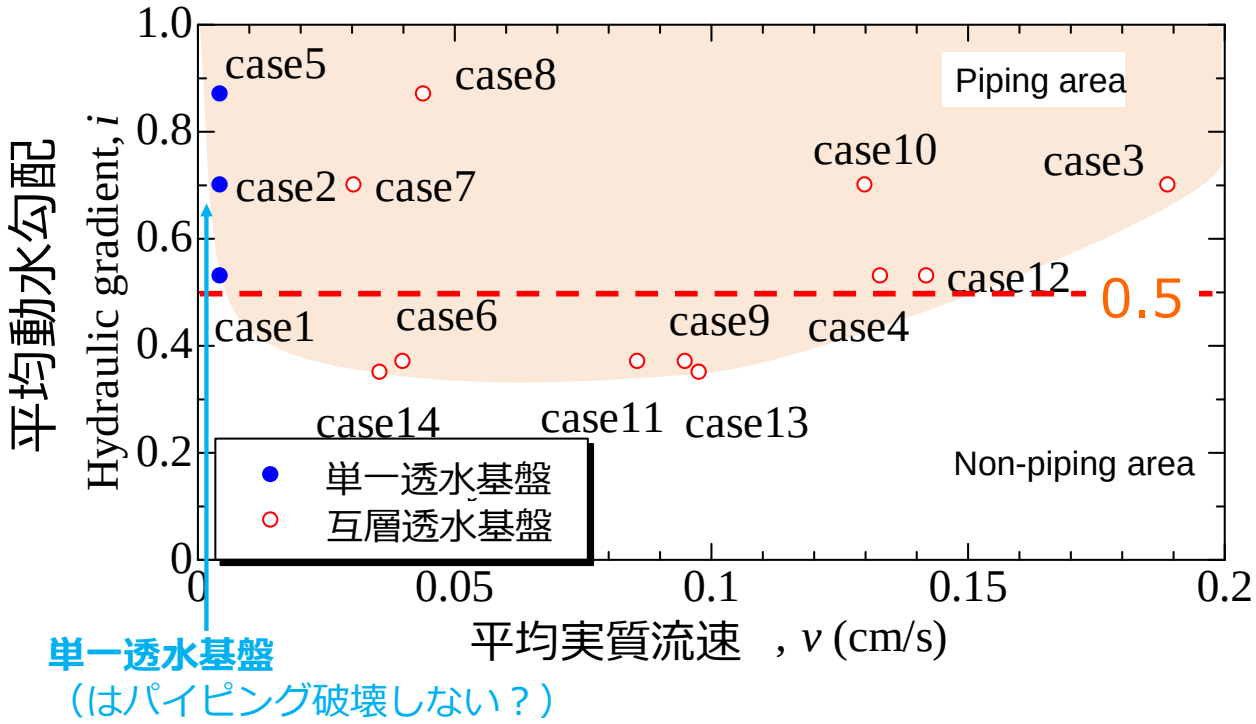
7

各スケールのダイナミクスの相互作用は破壊を進行させるのか？



実用的なパイピング破壊条件の検討に向けて
動水勾配－限界流速関係

動水勾配だけでなく限界流速でも評価が必要



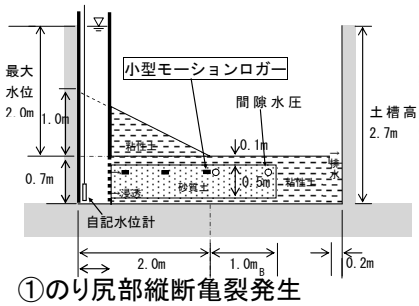
浸透水による堤体法尻部・基盤表層部の弱体化

国土交通省

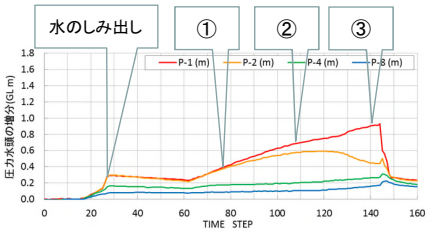
砂層の単独の場合、相当な水位が作用してはじめて堤体から変状進行

平均動水勾配0.25で堤体法尻に亀裂発生、0.45で漏水増加、破壊は堤体から

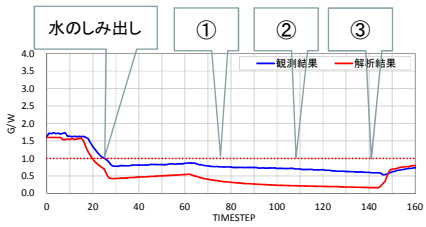
揚圧力G/Wは実測0.7、解析0.5で亀裂、実測0.6、解析0.4で漏水増加



①のり尻部縦断亀裂発生



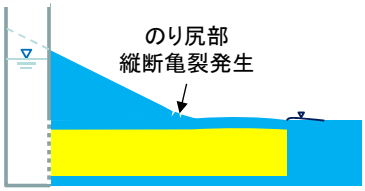
［透水層における水圧経時変化］

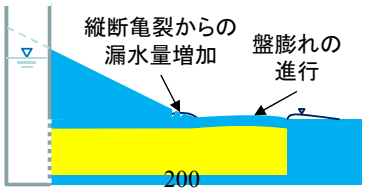


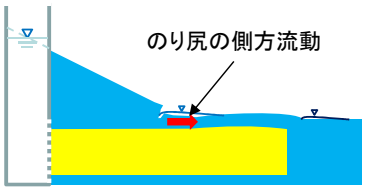
［のり尻部におけるG/W経時変化］

②縦断亀裂からの漏水量増加

③大変形







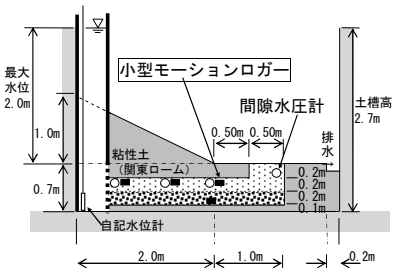
噴砂発生と同時に広範囲の砂質土の移動

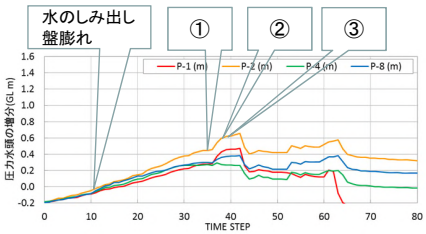
国土交通省

砂層と礫層の複合の場合、比較的低い水位で噴砂が発生

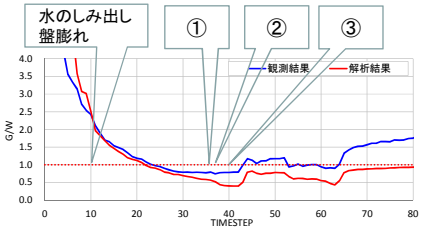
平均動水勾配0.25で噴砂発生、0.4で亀裂発生、破壊は基盤から

揚圧力G/Wは実測0.8、解析値0.5で噴砂、実測0.8、解析値0.4で亀裂



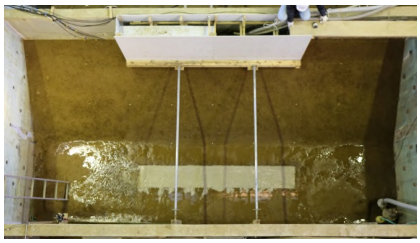


［透水層における水圧経時変化］

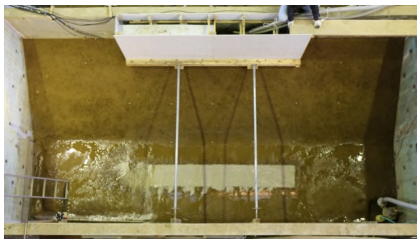


［のり尻部におけるG/W経時変化］

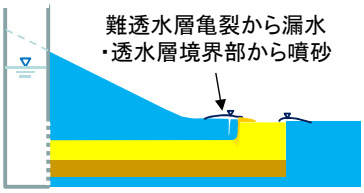
①漏水・噴砂発生

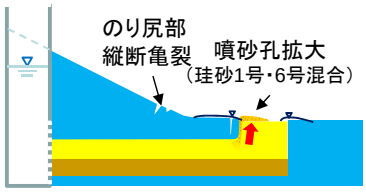


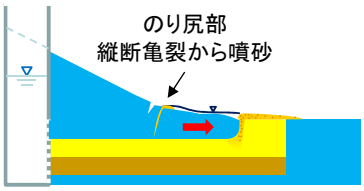
②のり尻部縦断亀裂・噴砂発生



③大変形







11

地盤特性の違いによる被災形態・規模の違い

国土交通省

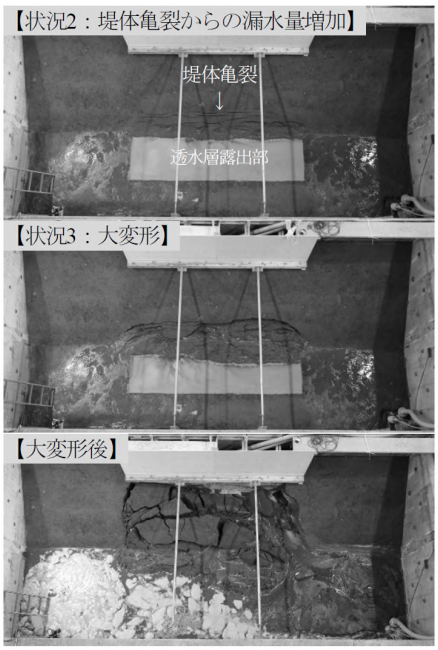


写真-2　実験経過状況（ケース1，状況2～大変形後）

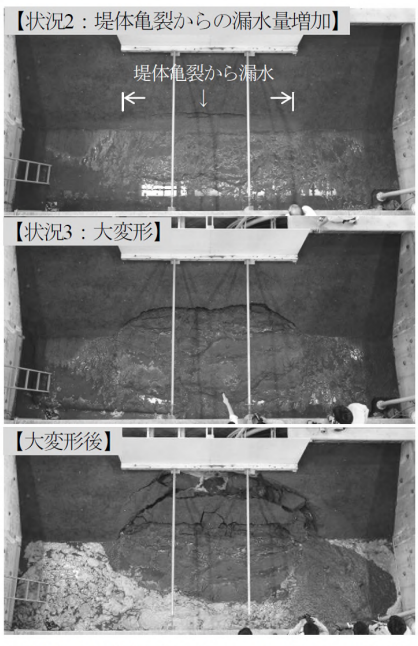


写真-4　実験経過状況（ケース2，状況2～大変形後）

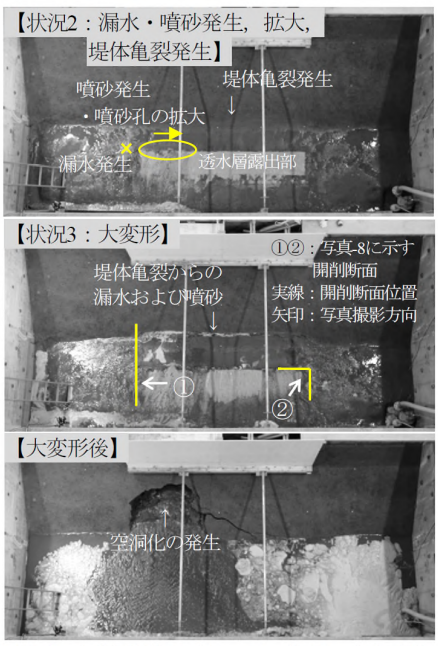


写真-6　実験経過状況（ケース3，状況2～大変形後）

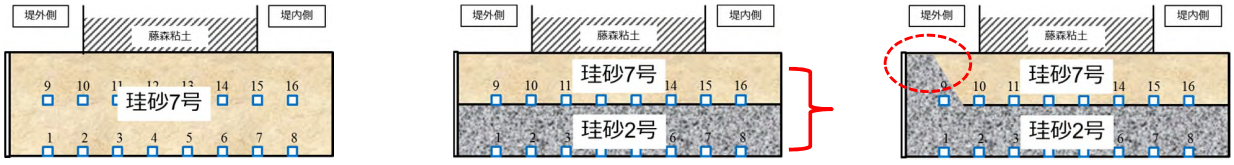
堤防の構造体としての性能が大きく違う

（堤体の亀裂が先行か，基盤層のパイピングが先行か）

効果的な補強方法や点検方法の判断！

12

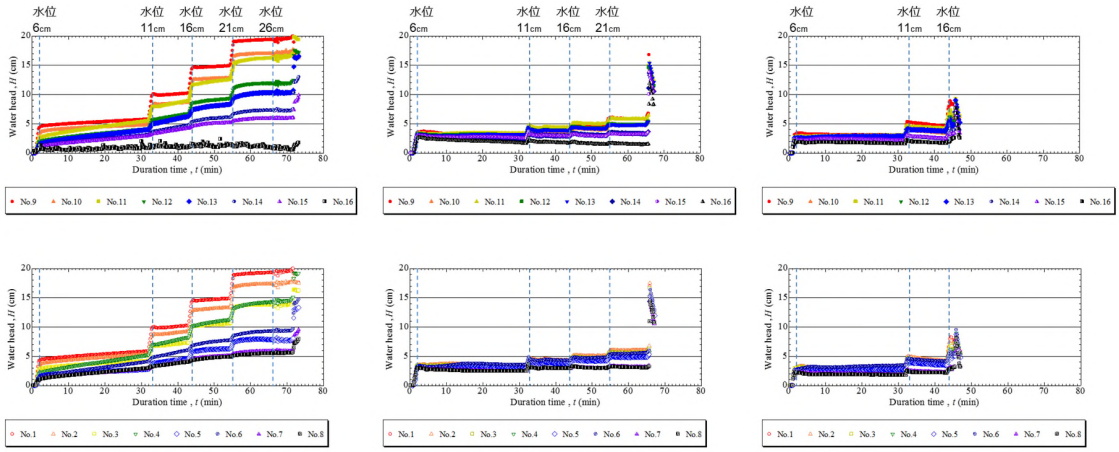
基盤層の土質・構造の違いによる圧力伝播の違い



パイピング発生なし　　パイピング発生あり

(a) case1　　(b) case2　　(c) case3

（参考：久楽勝行，吉岡淳，佐藤正博：水平方向浸透流下における砂地盤のﾊﾟｲﾋﾟﾝｸﾞについて,第20回土質工学研究発表会,pp.1483-1484, 1985.）



地盤特性の違いによる被災形態・規模の違い

国土交通省

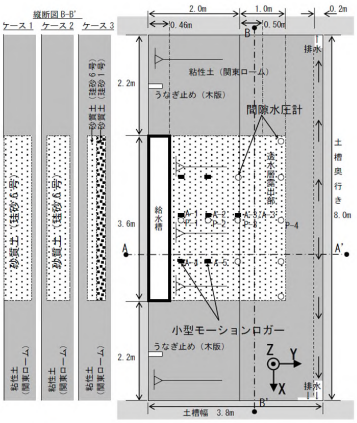


図-1　実験模型概要平面図（ケース1～3）

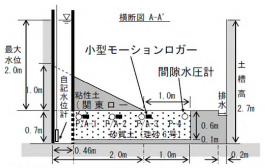


図-2　実験模型概要横断図(ケース1)

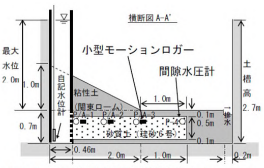


図-3　実験模型概要横断図(ケース2)

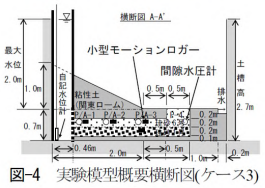


図-4　実験模型概要横断図(ケース3)

写真-1　小型モーションロガー

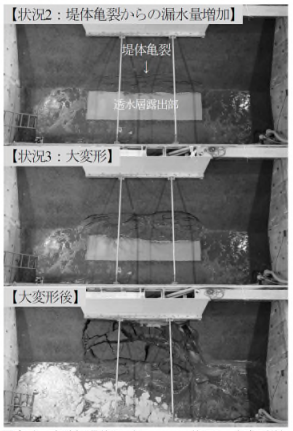


写真-2　実験経過状況（ケース1，状況2～大変形後）

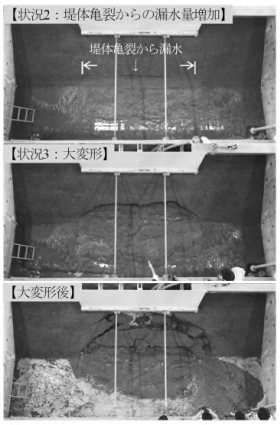


写真-4　実験経過状況（ケース2，状況2～大変形後）

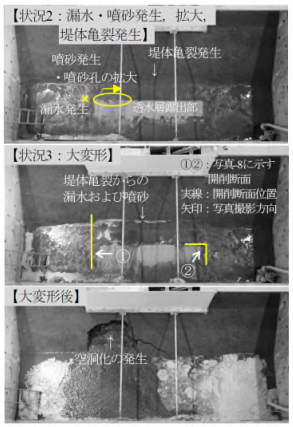


写真-6　実験経過状況（ケース3，状況2～大変形後）

堤防の構造体としての性能が大きく違う

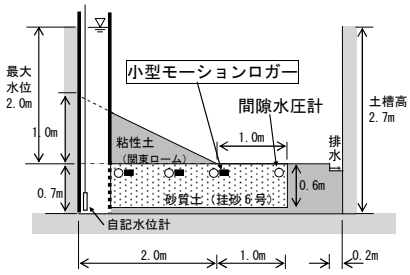
浸透水による堤体法尻部・基盤表層部の弱体化

国土交通省

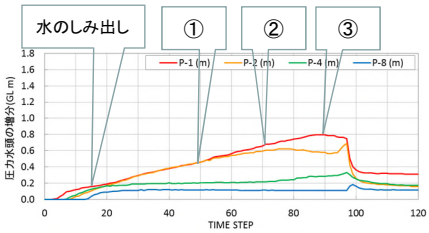
砂層の単独の場合、相当な水位が作用してはじめて堤体から変状進行

平均動水勾配0.25で堤体法尻に亀裂発生、0.42で漏水濁り発生、破壊は堤体から

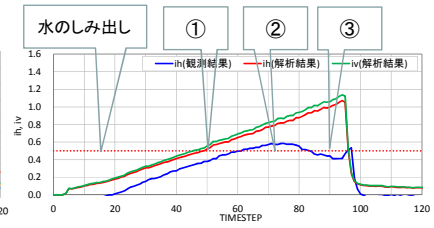
局所動水勾配ihは実測0.4、解析0.5で亀裂、実測0.6、解析0.8で漏水濁り



①のり尻部縦断亀裂発生



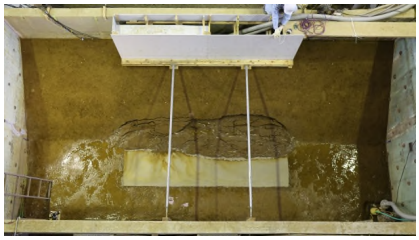
［透水層における水圧経時変化］

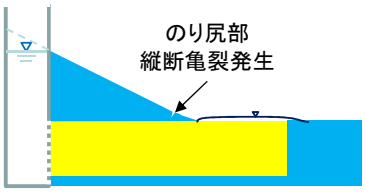


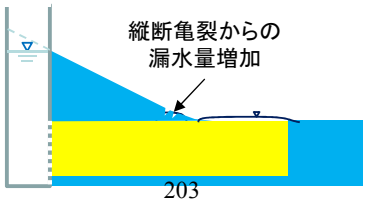
［のり尻部におけるiv,ih経時変化］

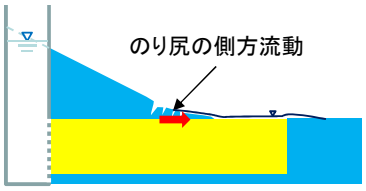
②縦断亀裂からの漏水量増加

③大変形







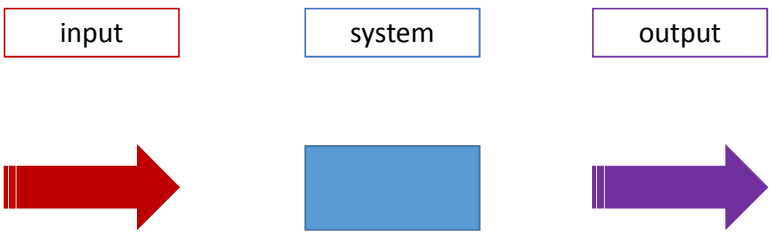


「土の不均質性・疎なデータを前提とした危険箇所の推定技術」の要点およびその取り組み

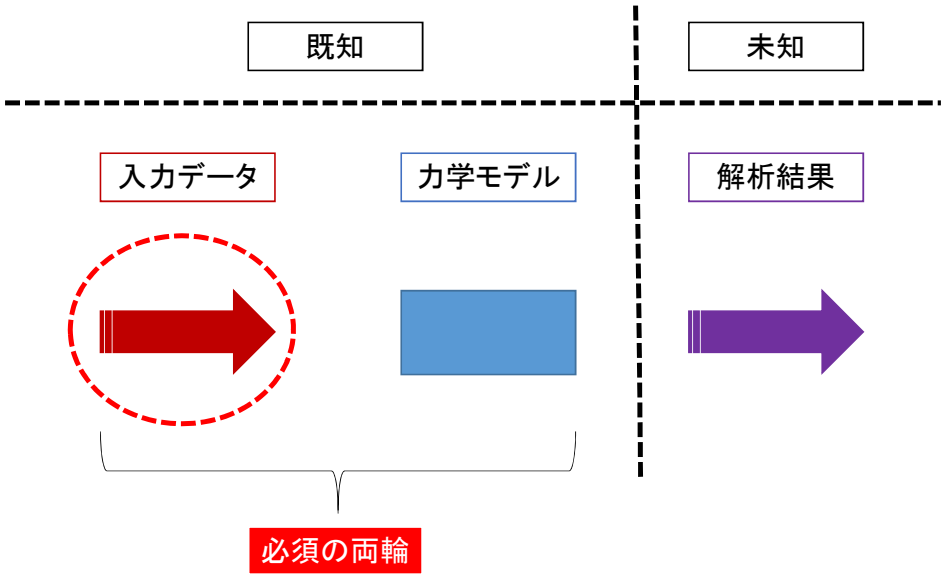
in 2015年度河川シンポジウムOPS2

(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)

精緻な力学モデルが得られたとしても・・・

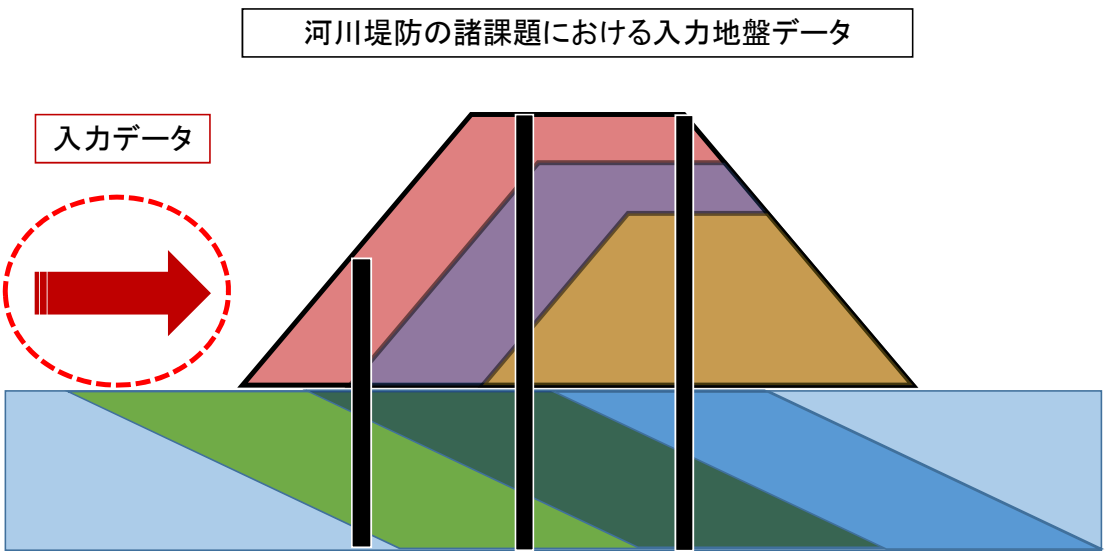


精緻な力学モデルが得られたとしても･･･

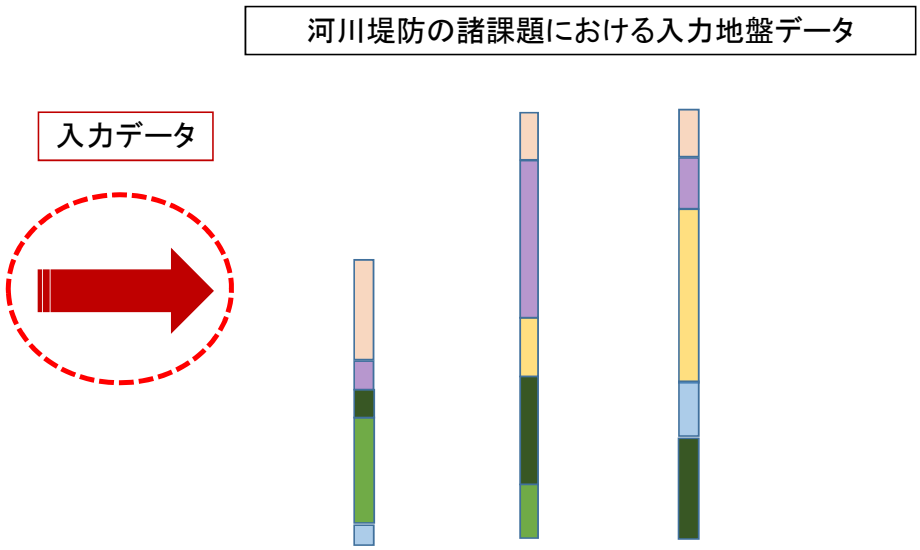


※於順解析

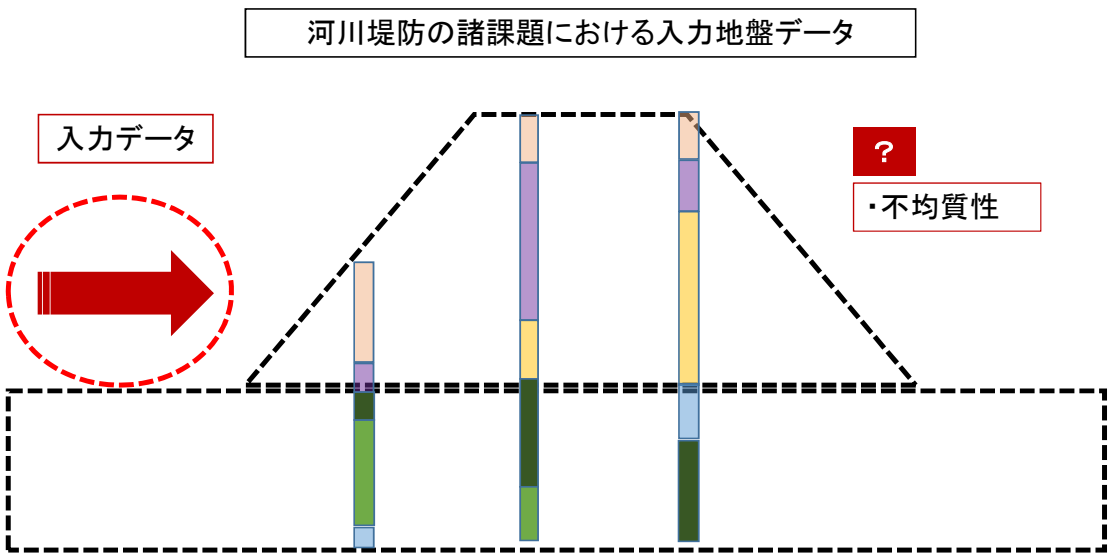
精緻な力学モデルが得られたとしても･･･



精緻な力学モデルが得られたとしても･･･



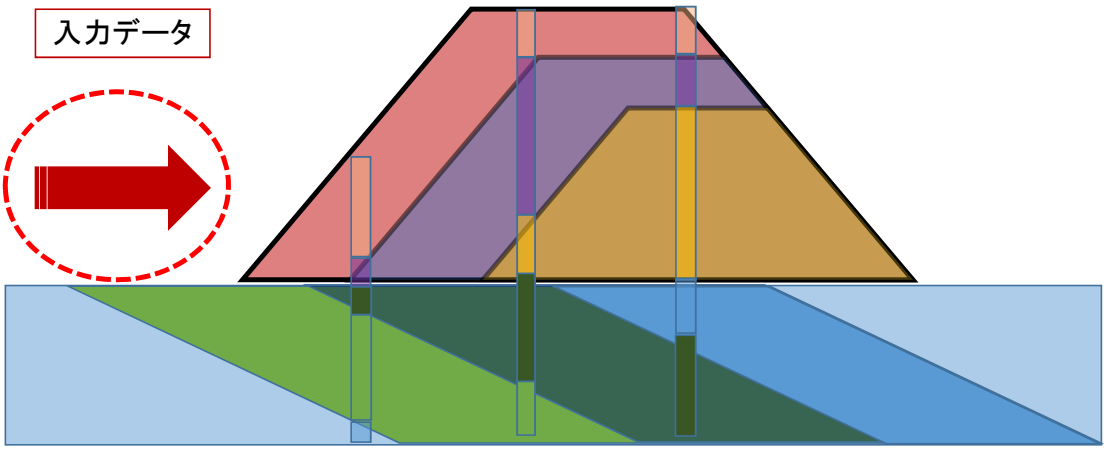
精緻な力学モデルが得られたとしても･･･



精緻な力学モデルが得られたとしても･･･

河川堤防の諸課題における入力地盤データ

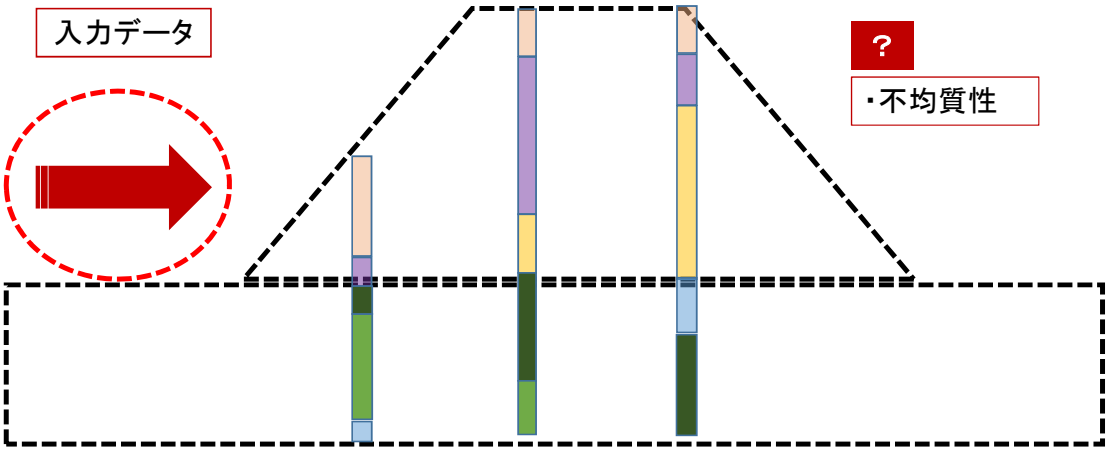
入力データ



精緻な力学モデルが得られたとしても･･･

河川堤防の諸課題における入力地盤データ

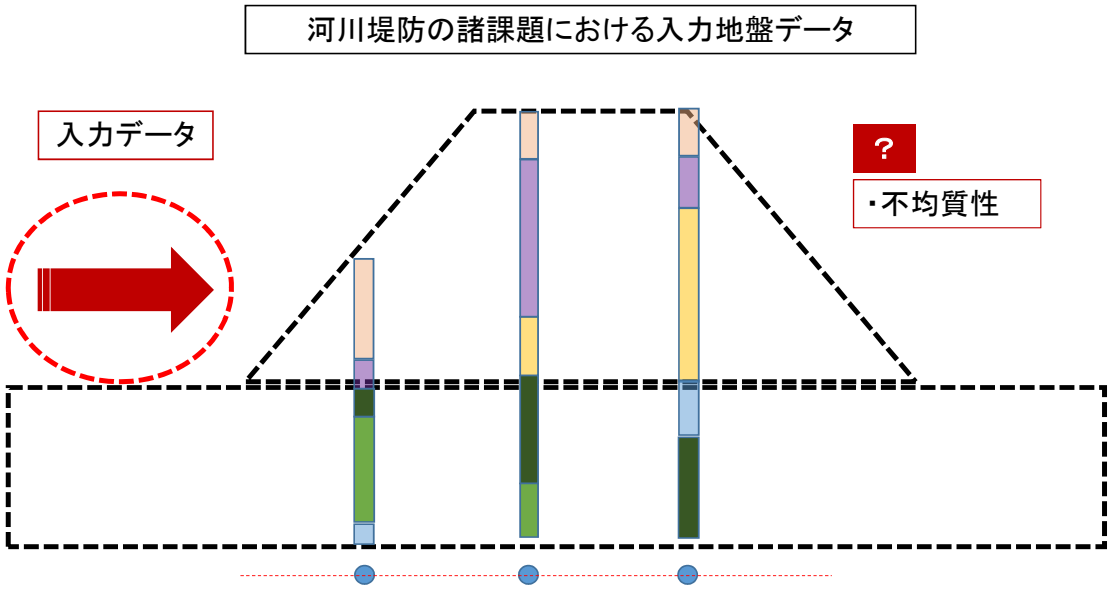
入力データ



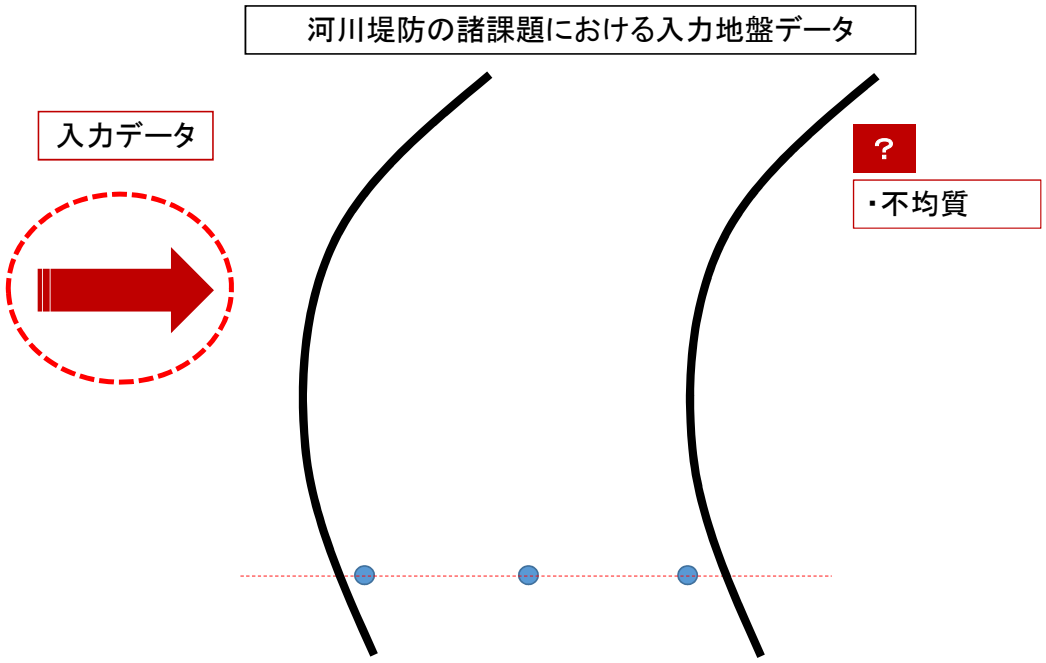
?

・不均質性

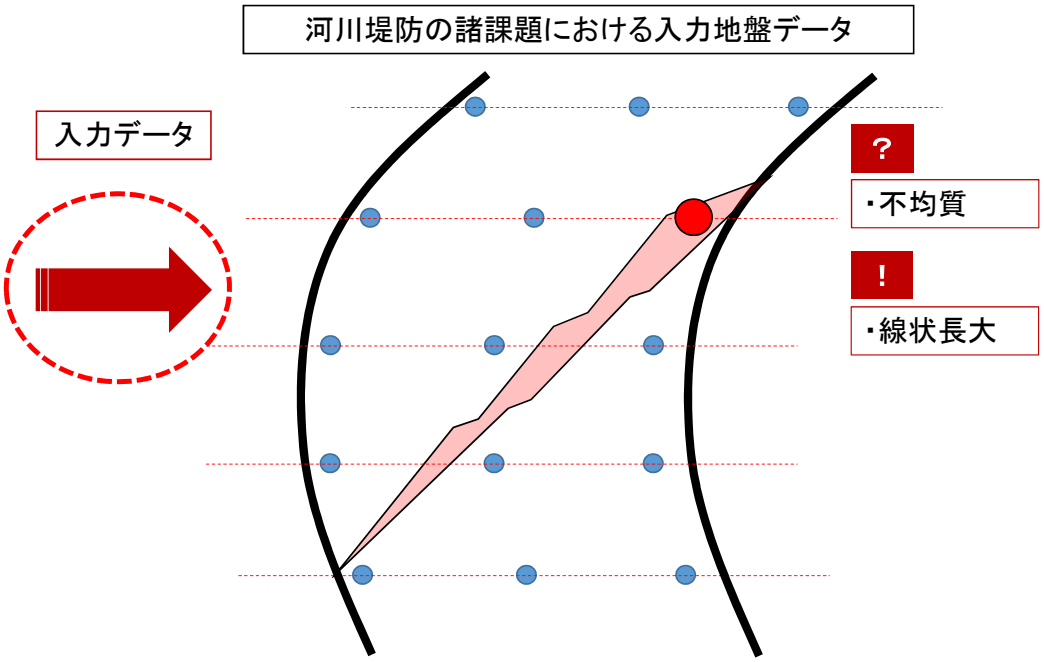
精緻な力学モデルが得られたとしても･･･



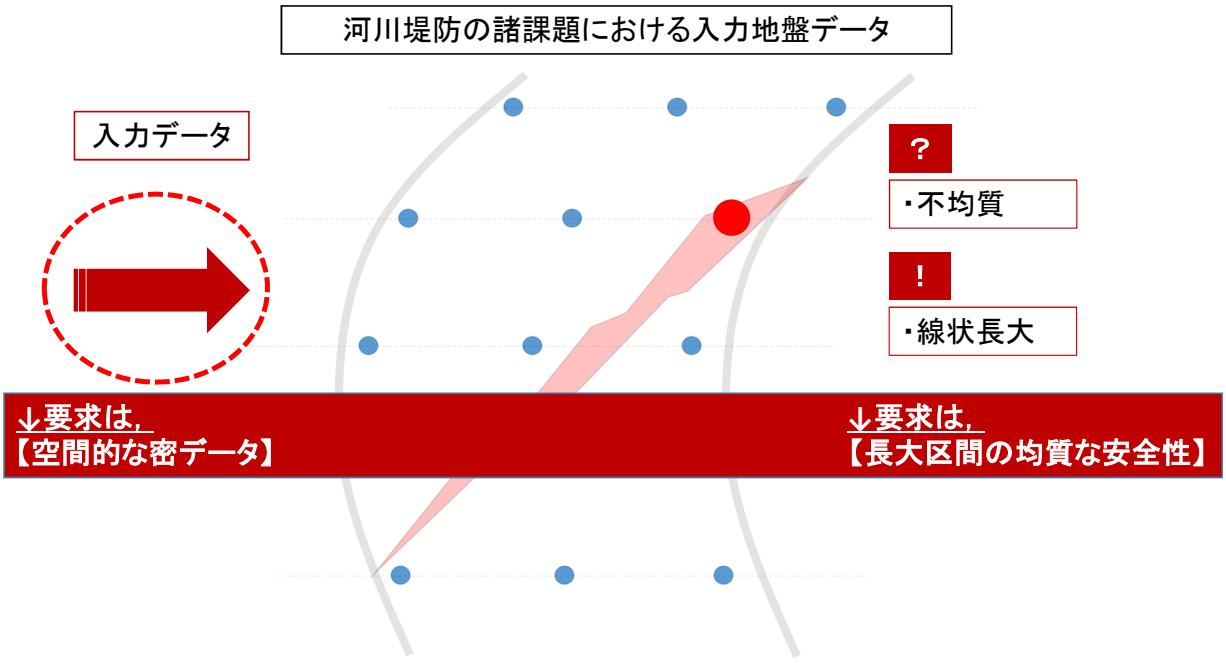
精緻な力学モデルが得られたとしても･･･



精緻な力学モデルが得られたとしても･･･



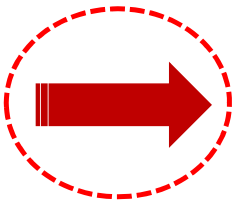
精緻な力学モデルが得られたとしても･･･



精緻な力学モデルが得られたとしても･･･

河川堤防の諸課題における入力地盤データ

入力データ



↓要求は，
【空間的な密データ】

ボーリングによる現状以上の高密度点データの取得は現実的に困難
点データと物理探査の併用による空間データへの補完は精度に課題

↓

高精度な空間的に密なデータの取得は困難

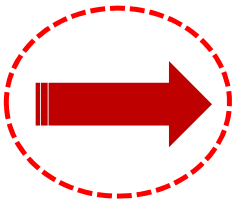
↓

現状では**不均質且つ疎なデータ**

不均質且つ疎なデータを前提とした取り組み

河川堤防の諸課題における入力地盤データ

入力データ



↓技術課題，
【空間的密データ取得】

↓実情は，
【不均質且つ疎データ】

【堤防挙動調査から間接的に土質を推定】

【堤防の経験外力と被災･無被災履歴から堤簿性能を調査】

【力学的検討の成果に基づく危険箇所抽出とその調査】

【要注意地形，埋設構造物の把握による定性的な状態把握】

【航空LP，UAV，MMS等による堤防形状の把握による性能調査】

【地盤内流速･含水率･水位等の連続観測による地盤特性の逆推定】

【統計的な危険度評価と信頼性解析による機関箇所のスクリ-ニング】

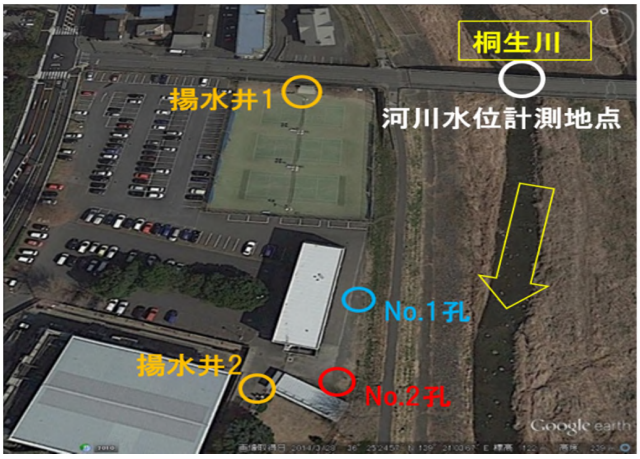
不均質且つ疎なデータを前提とした取り組み

河川近傍砂礫層の透水性と河川伏流水の流動特性に関する考察(松本)

入力データ

↓技術課題,
【空間的密データ取得】

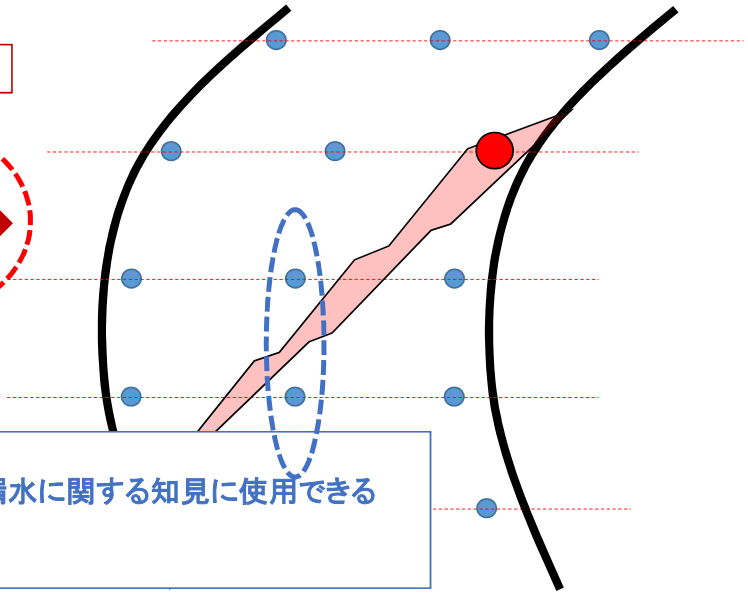
↓技術課題,
【不均質・疎データ解析】



不均質且つ疎なデータを前提とした取り組み

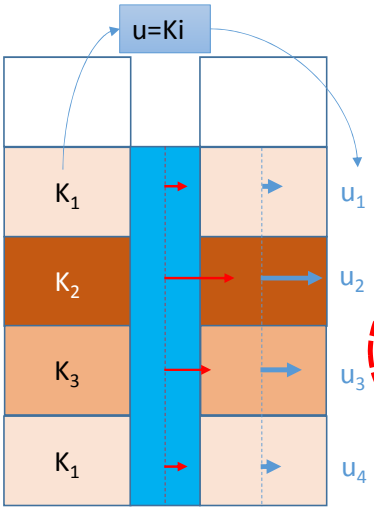
河川近傍砂礫層の透水性と河川伏流水の流動特性に関する考察(松本)

入力データ

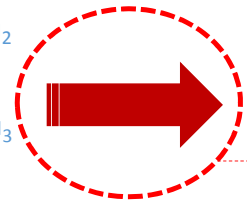


【仮定】
1) 堤防至近部伏流水の動態は堤防基盤漏水に関する知見に使用できる

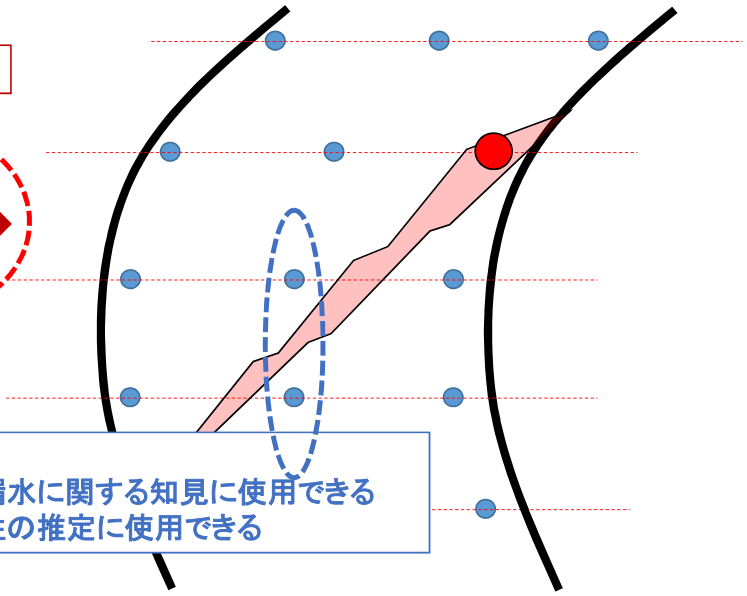
不均質且つ疎なデータを前提とした取り組み



入力データ

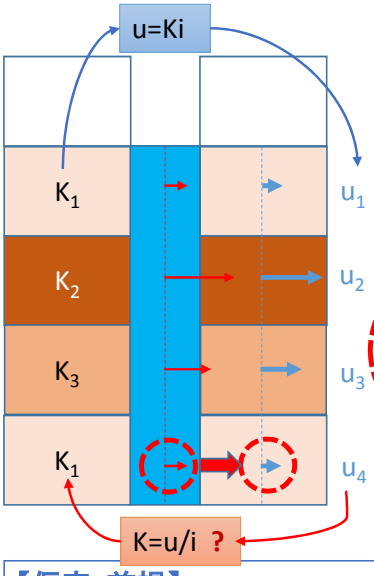


河川近傍砂礫層の透水性と河川伏流水の流動特性に関する考察(松本)

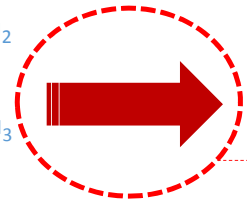


【仮定・前提】
1) 堤防至近部伏流水の動態は堤防基盤漏水に関する知見に使用できる
2) 地下水観測孔内の流況が周辺地盤特性の推定に使用できる

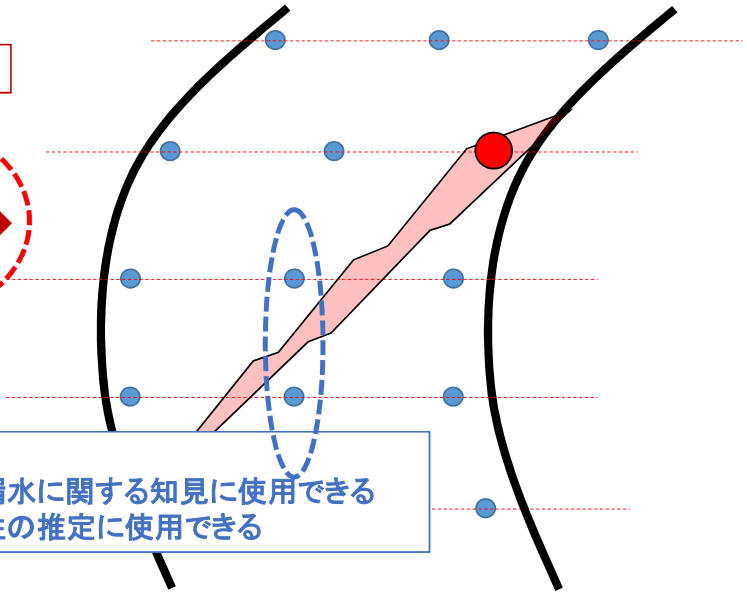
不均質且つ疎なデータを前提とした取り組み



入力データ

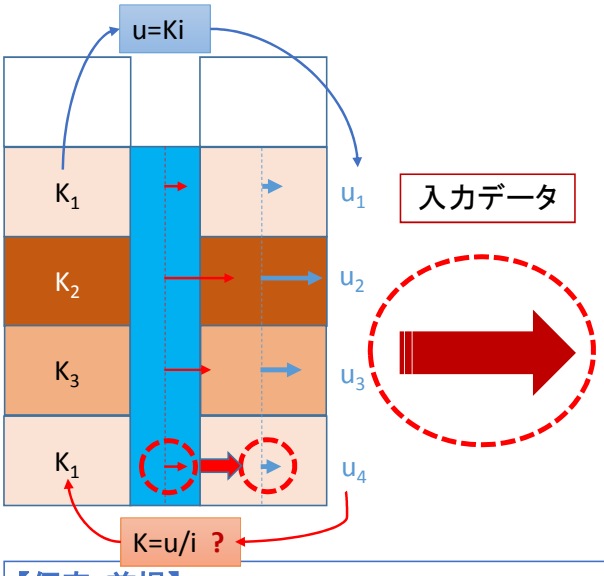


河川近傍砂礫層の透水性と河川伏流水の流動特性に関する考察(松本)



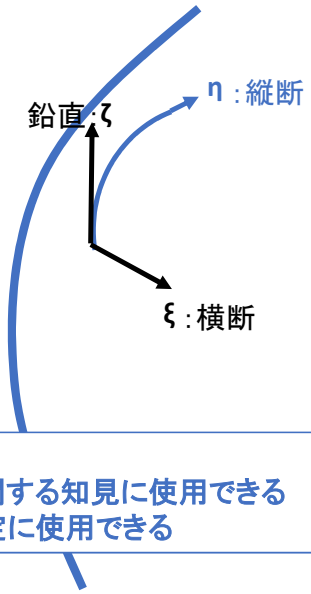
【仮定・前提】
1) 堤防至近部伏流水の動態は堤防基盤漏水に関する知見に使用できる
2) 地下水観測孔内の流況が周辺地盤特性の推定に使用できる

不均質且つ疎なデータを前提とした取り組み



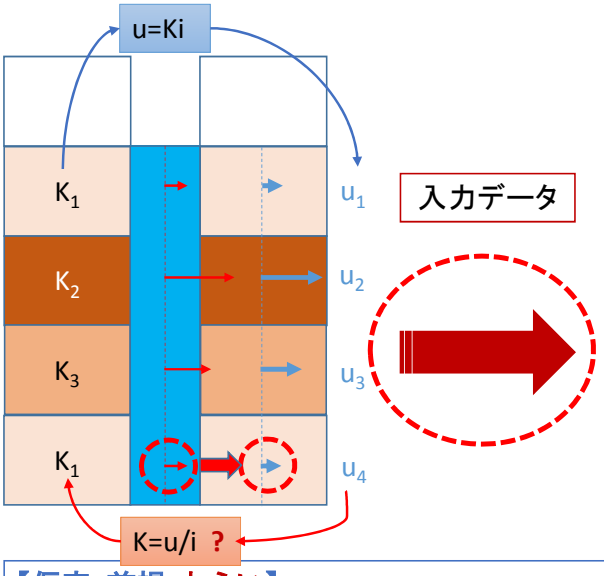
入力データ

河川近傍砂礫層の透水性と河川伏流水の流動特性に関する考察(松本)



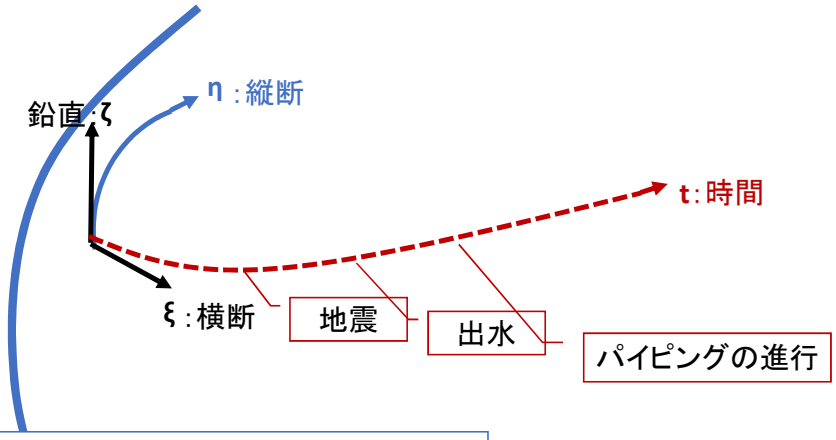
【仮定・前提】
1) 堤防至近部伏流水の動態は堤防基盤漏水に関する知見に使用できる
2) 地下水観測孔内の流況が周辺地盤特性の推定に使用できる

不均質且つ疎なデータを前提とした取り組み



入力データ

河川近傍砂礫層の透水性と河川伏流水の流動特性に関する考察(松本)



【仮定・前提・ねらい】
1) 堤防至近部伏流水の動態は堤防基盤漏水に関する知見に使用できる
2) 地下水観測孔内の流況が周辺地盤特性の推定に使用できる
3) 出水時応答を含めた堤防基盤の透水性の時間軸方向の変化を検出できないか?

現場【Field】と解析技術【Lab】をつなぐために

- 不均質な場の高精度・高密度データ取得技術
- 場の不均質性に立脚した技術

教訓・課題③状態監視のみでは危険箇所を特定できない

教訓・課題③状態監視のみでは
危険箇所を特定できない
（経験的知見・技術の集積・体系化）

縦断的に堤防の特徴を把握
1）被災・変状履歴の記録の徹底
2）経験的知見の検証と教訓の活用
3）検討を広く行う場の設置

補完

持てる情報をもとに
経験知を総動員し，
技術的判断

教訓・課題①　破堤に至るか否かを
分けた要因（力学的解釈）

教訓・課題②　高い密度の調査を
全川的に行うのは困難
（危険箇所の推定技術）

縦断的に堤防の特徴を把握

堤防の概略点検

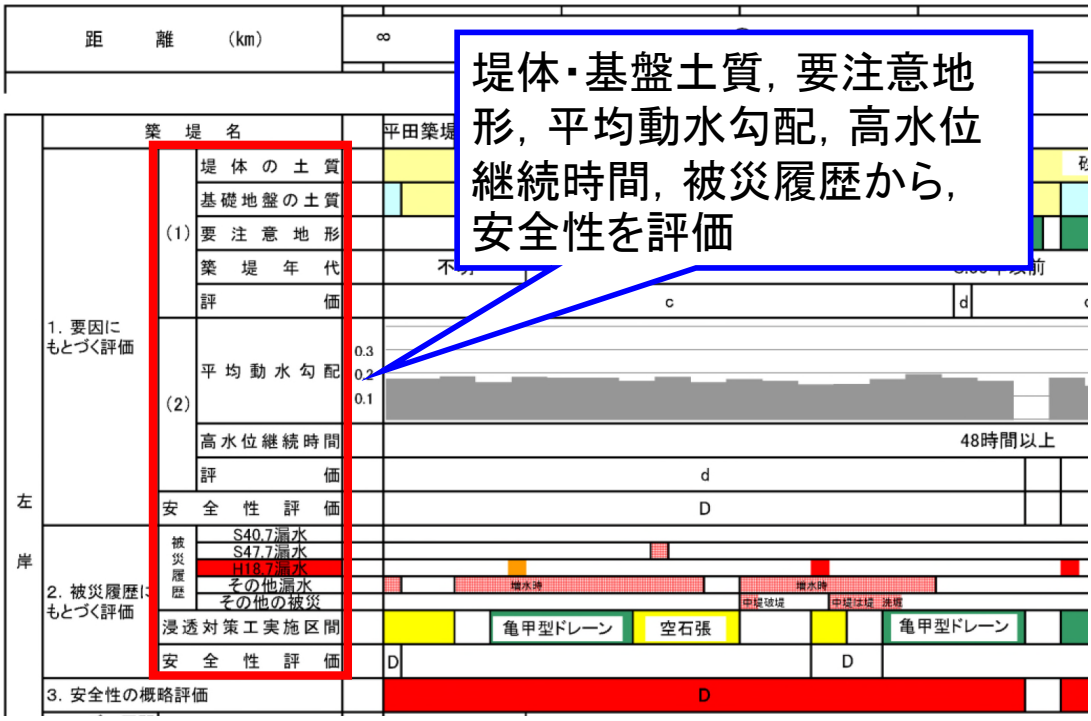


図　河川堤防の概略点検

今後，新たな情報の追加，高精度化の検討などが必要

1）被災・変状履歴の記録の徹底

被災履歴と浸透に関する変状の発生位置

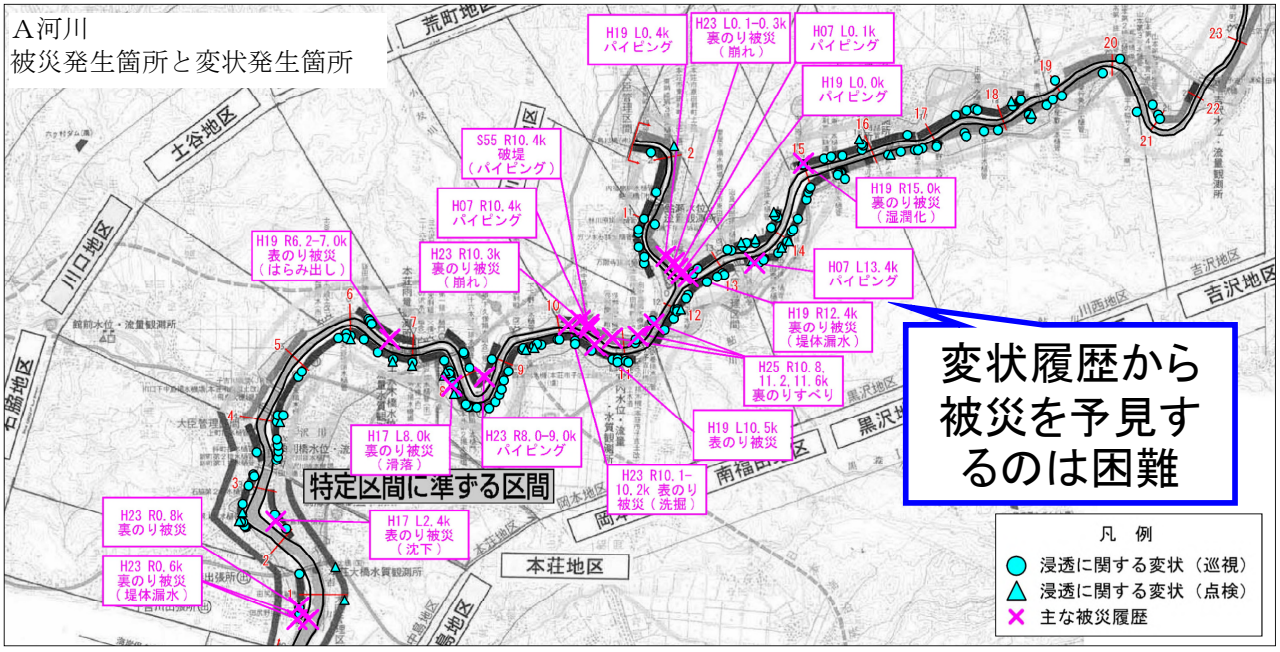


図　被災履歴と巡視点検により発見される変状の位置

下川ら：変状と被災の統計的解析による堤防の点検及び巡視の合理化に関する一考察

今後，さらなる情報の蓄積が必要

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

下川ら：変状と被災の統計的解析による堤防の点検及び巡視の合理化に関する一考察

平均法面勾配が急なほど被災可能性高

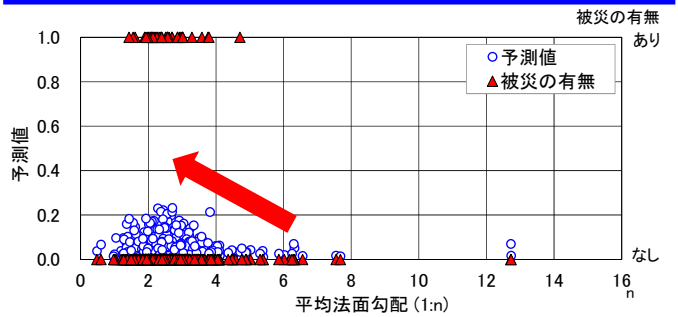


図　平均法面勾配とすべりの関係

平均動水勾配が急なほど被災可能性高

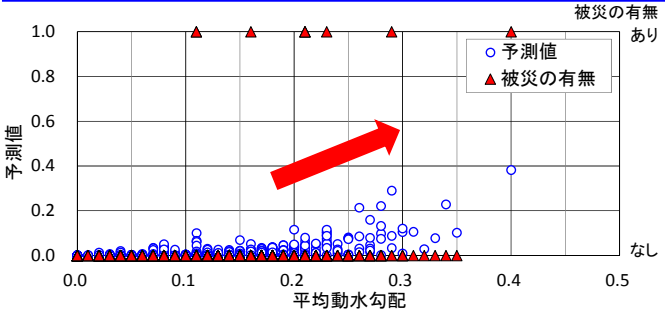


図　平均動水勾配とパイピング・漏水の関係

堤体・基盤土質により明確な傾向なし

表　土質構成別のすべりの予測値

堤体土 ＼ 基礎地盤	粘性土	砂質土	礫質土
粘性土	0.18	0.12	0.04
砂質土	0.17	0.18	0.11
礫質土	0.23	0.18	0.09

基盤礫質もしくは堤体砂質が被災可能性高

表　土質構成別のパイピング・漏水の予測値

堤体土 ＼ 基礎地盤	粘性土	砂質土	礫質土
粘性土	0.03	0.10	0.01
砂質土	0.04	0.29	0.07
礫質土	0.38	0.12	0.08

今後，継続的な分析が必要

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

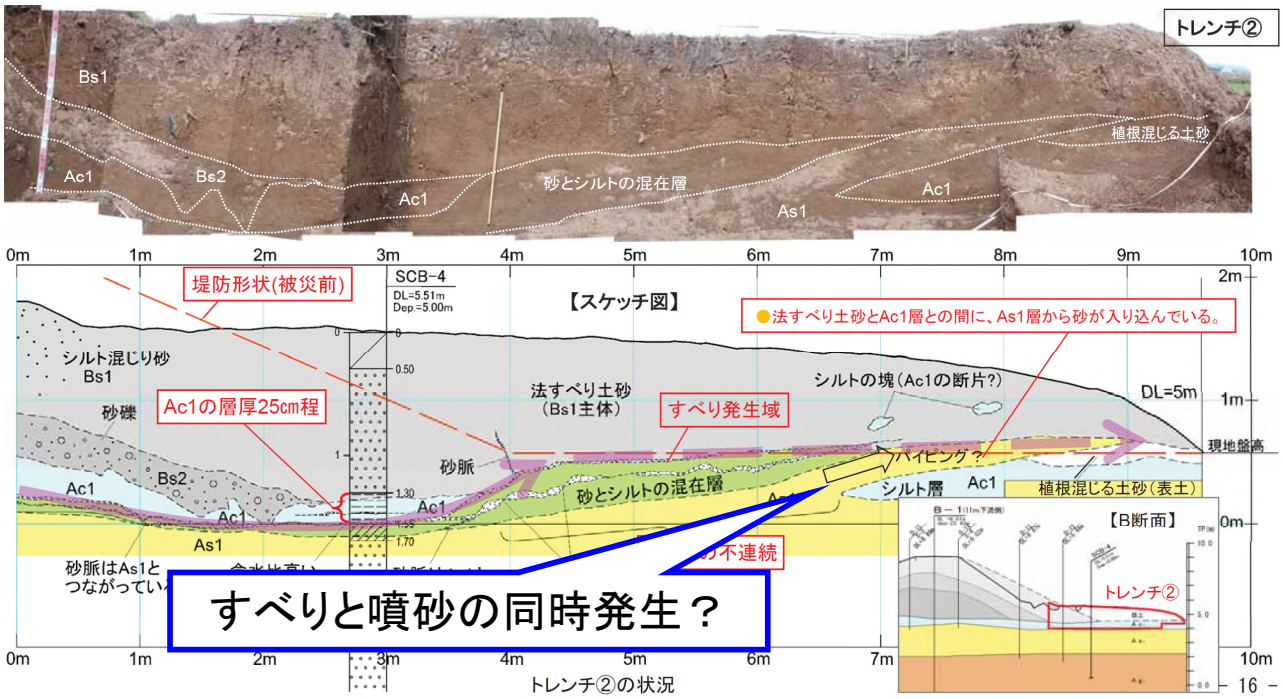


図　子吉川堤防被災における開削調査結果

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

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

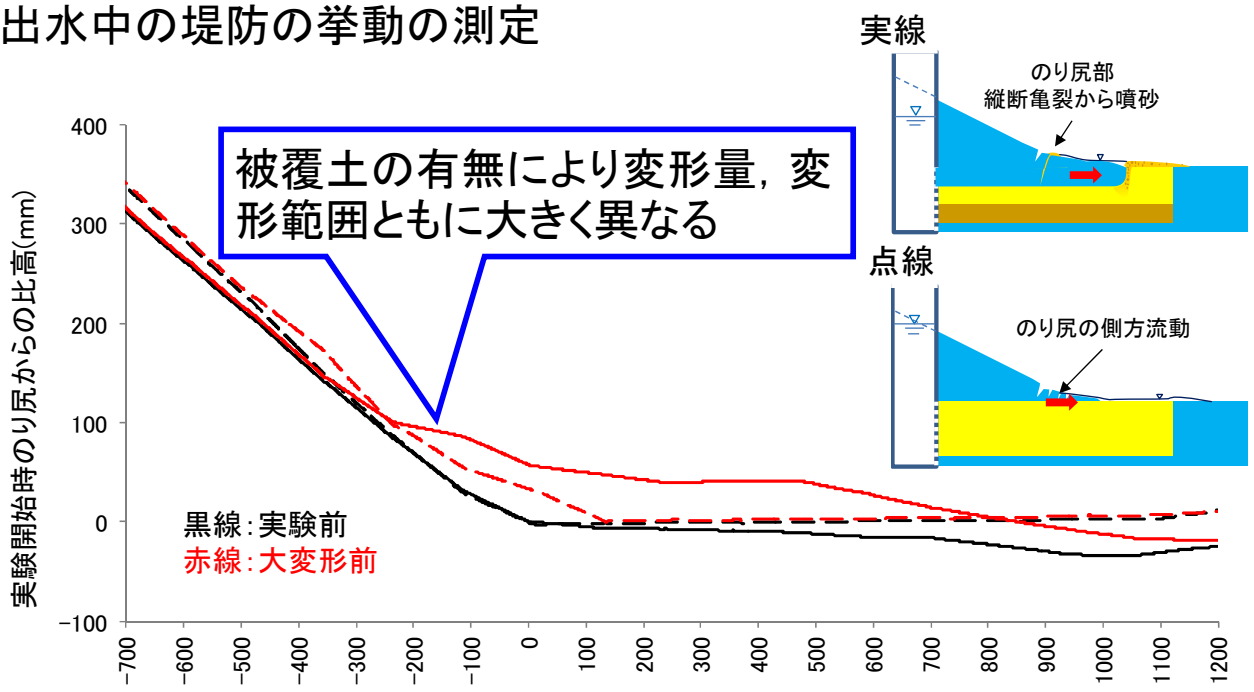


図　模型実験における堤防変状測定結果

今後，さらなる危険箇所推定技術の検討が必要

3）検討を広く行う場の設置

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

土木学会「河川部会　堤防WG」，「地盤工学委員会堤防研究小委員会　浸透・侵食・洗掘WG」（2012.2～2015.9（予定））

同様の場を設置（新WG，新メンバー），期間を区切って成果の公表を繰り返す

各教訓・課題に関する発表論文

河川堤防に関する発表論文のうち，浸透による破堤に至るメカニズム解明を目的とした，各教訓・課題に関連する論文数の動向を整理する。

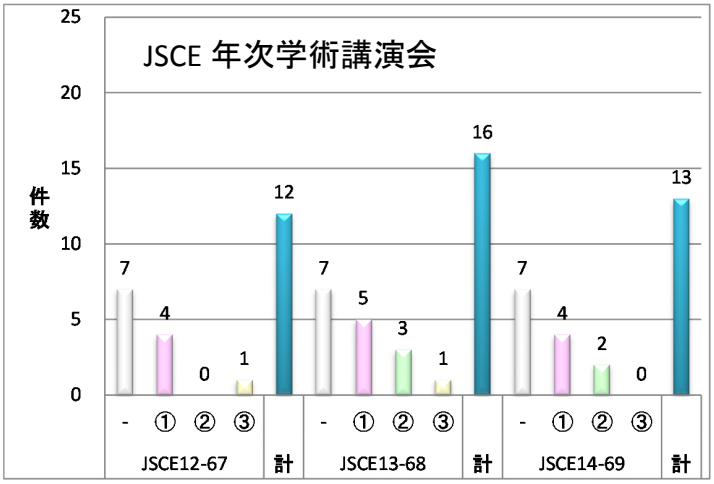
◆教訓・課題①　破堤に至るか否かを分けた要因
・実験的，解析的研究

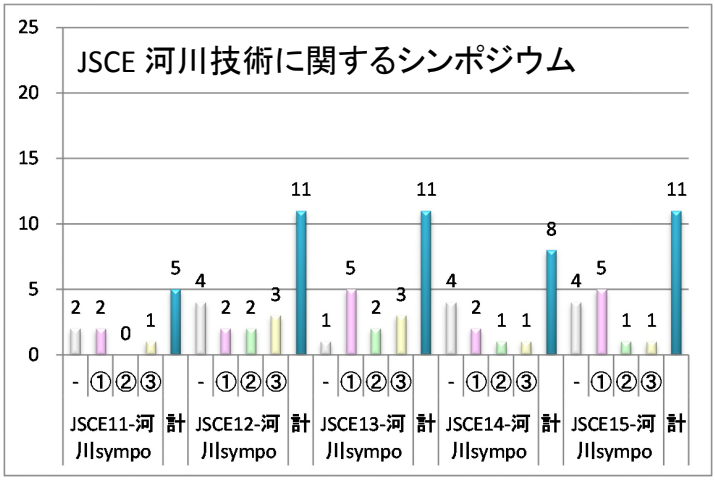
◆教訓・課題②　高い密度の調査を全川的に行うのは困難
・調査，危険箇所推定に関する研究

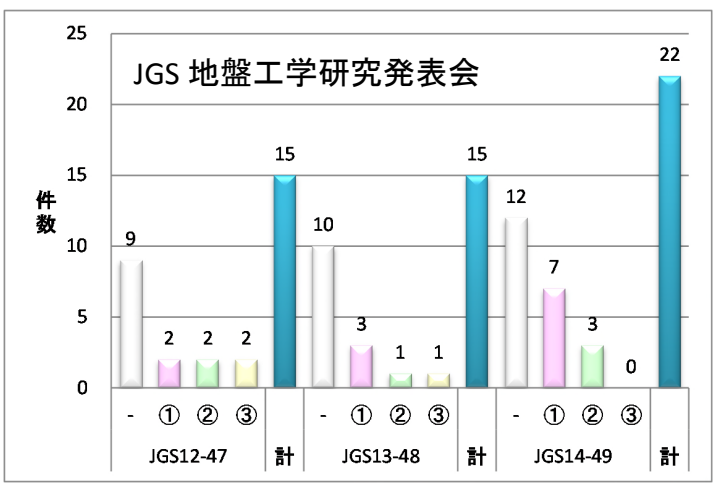
◆教訓・課題③状態監視のみでは危険箇所を特定できない
・経験的判断，維持管理に関する研究

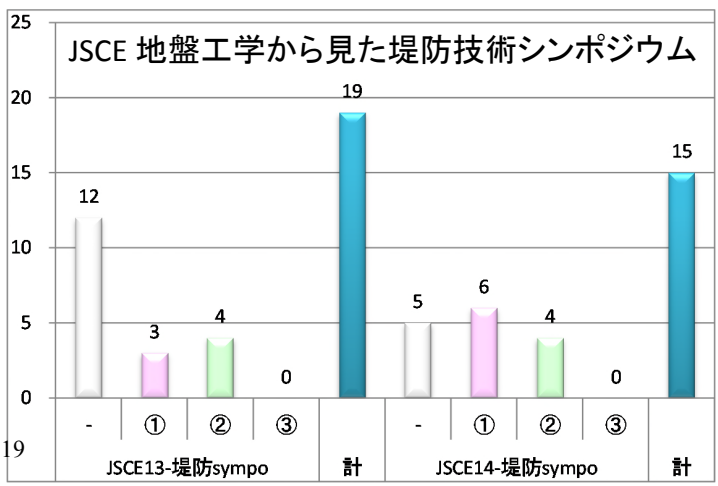
→JSCE：年次学術講演会，河川シンポ，堤防シンポ
→JGS：地盤工学研究発表会

各教訓・課題に関する発表論文

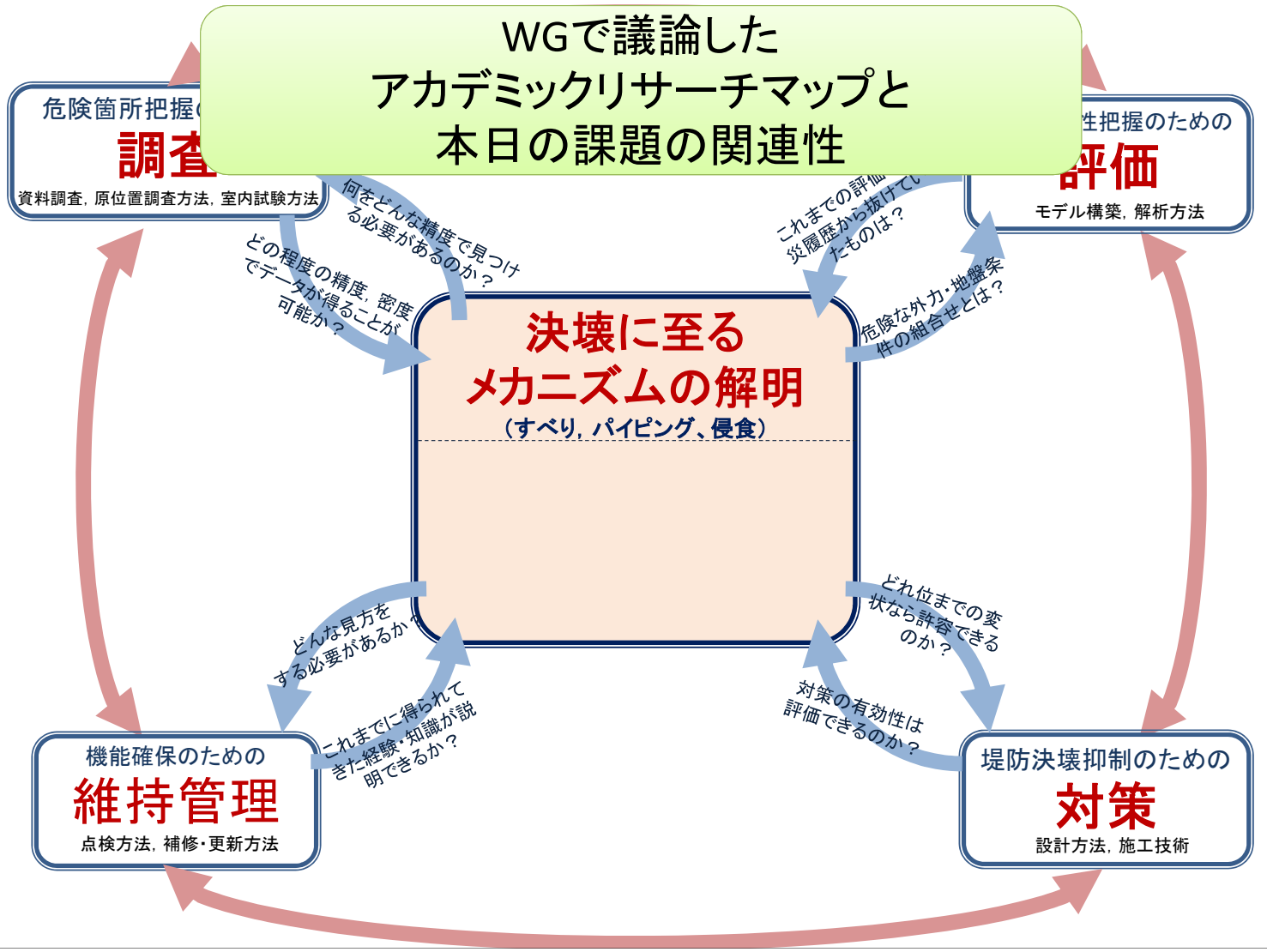


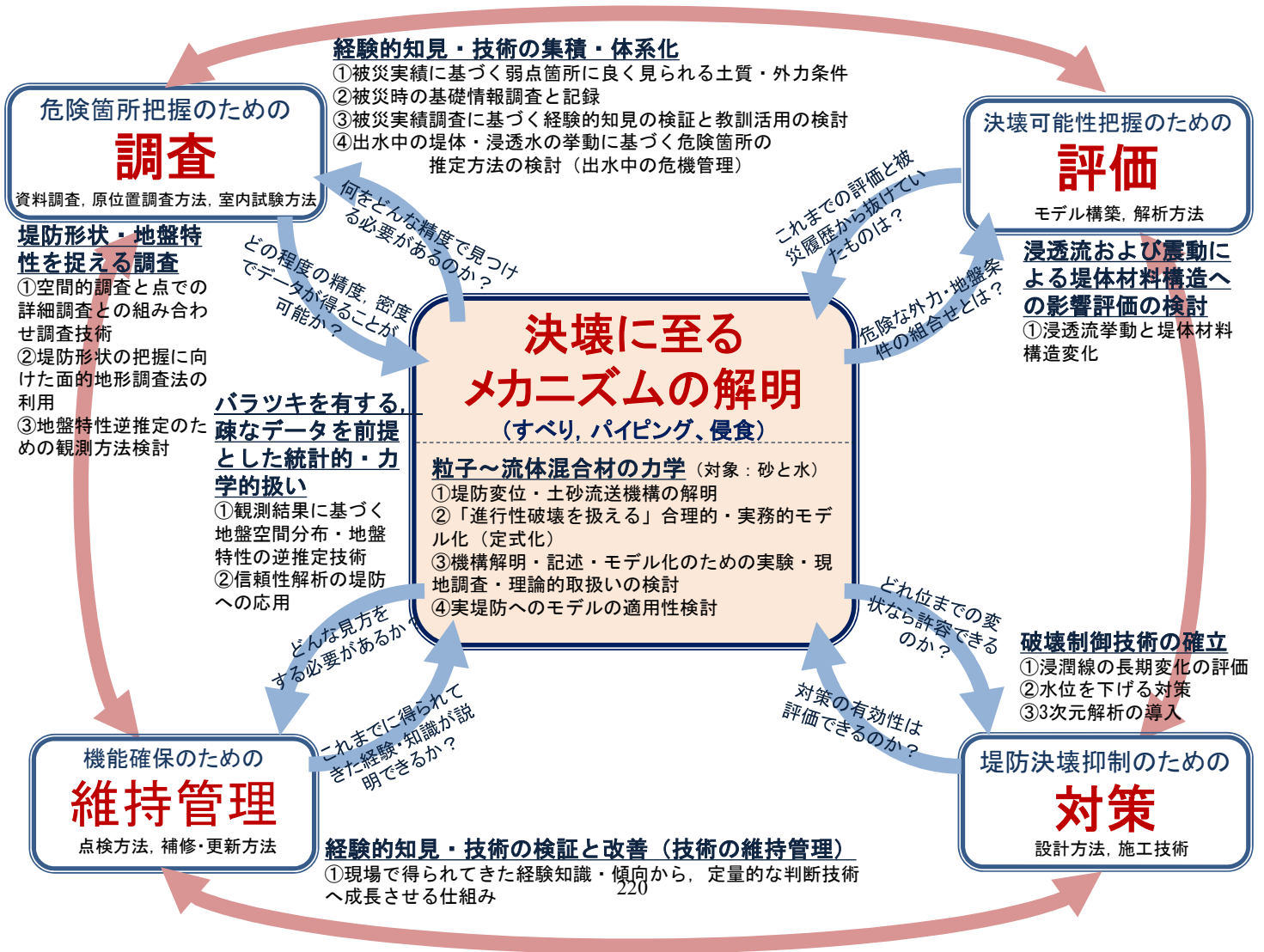






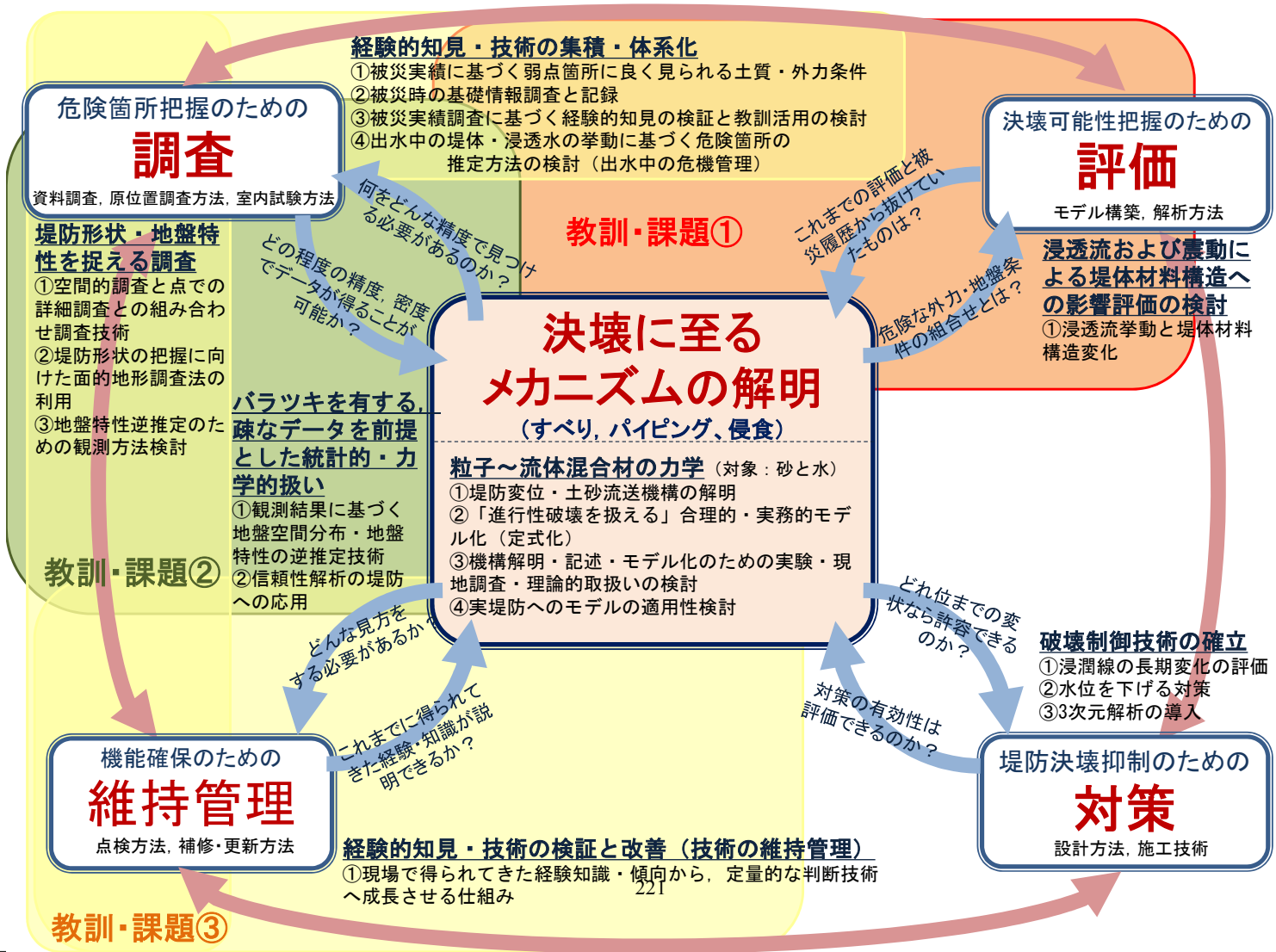
WGで議論した
アカデミックリサーチマップと
本日の課題の関連性





基調講演 「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