

2023.6.23(金) 河川シンポジウム
オンライン

堤防関係OPS 第29巻採択原稿・課題整理等総括 浸透関係

国立研究開発法人土木研究所
河川総括研究監 諏訪 義雄

河川シンポジウム(含む河川技術論文集)

- 各技術者・研究者の日頃の調査研究成果を披露し、(技術者・研究者の自由な発想を尊重しつつ)議論し・褒め称えあう場

+

- 「河川技術上の重要課題あるいは分野について、必要なインターフェース的機能を確保しつつ、調査・研究活動等を実施し、課題分析、知見の体系化、発展の方向性や技術水準の提示などを行う(会則第3条より)」場となってほしい。
- ⇒ディスカッションを1週間延長します

1. 浸透関係課題認識(具体的事象で表現)

- 課題認識については、既往のOPS等で、アカデミックリサーチマップとしてまとめられている。
- ここでは、一般化したアカデミック表現ではなく、実務・現場的な見方で各自の課題認識を比較してみたい。目的は解決できているものと、未解決なものを俯瞰したい。これを共有することで、(仮に抜けているものあれば)技術開発や調査研究を促すことにつながれば。
- 諏訪からは、1)基礎地盤・堤防,2)樋門等周辺堤防 の2つに分けて、洪水レスポンスフロー図(場の特殊性・劣化等の素因を含むフローと洪水応答部分を中心にしたフローの2種類あり)上でOPS時の意見交換で伺った課題、諏訪が課題と思うことを薄黄色網掛けで表示してみた。
- 確認いただくとともに、抜けているものをこれに加筆いただけると助かります。皆様が他の表現方法で課題整理しているものご存じでしたら提供いただければ、合わせて共有します(提供者・出典を明示して)。

課題と思われること(OPS議論含む)

- 降雨浸透でのり崩れが多発していた時期がある(山村,中島,瀬川). その後降雨のり崩れは問題にされなくなった(多発しなくなったためと推察される). この要因を,施工技術の向上,対策の進展等から説明できることは気候変動対応に向かう上で重要
- 土質振動Tが盛土の締め固め度が95%以上になると,地震変形も浸透変形も起きにくいという実験から得ている経験的知見を持っている. これを, 締め固め度-透水係数,締め固め度-強度で説明できれば, 過去の時期ごとの築堤部分の評価も可能になるのでは
- 透水係数が現場試験と室内試験で異なる場合が少なくない. なぜ違いが生じるのか, どちらを採用することが妥当なのかについて整理が十分でない可能性がある.
- 噴砂がすべて要注意とすべきなのかは疑問がある(噴砂にも要注意の噴砂と経過観察でよい噴砂があるのではないか). →両者の違いは何か? 共通認識になっていないのでは?
- 噴砂とパイピングの区分も共通認識になっていない可能性がある(小高先生・諏訪:堤体変形と併せて区分(小高先生:過剰間隙水圧による裏法崩れも広義パイピング, 諏訪:浸透流が限界流速を超えた領域で砂層が液状化し裏法崩れ・側方流動するのではないか), 従来の共通認識:パイピングは空洞が川表側に発達し貫通後拡大する現象).
- 噴砂が起きるメカニズムについても人によって解釈が異なっている(諏訪:液状化している,中島:砂粒の単粒子沈降速度を超える鉛直上向き流速が発生すると生じる等)
- 浸透流解析と堤防安定性検討が一体で行われてない場合がある→浸透流解析で Δu が得られていても堤体安定性照査に引き継がれず安定性照査に反映されていない可能性がある.
- メンテナンスの理屈上は, キツネ・アナグマ・ウサギ等の巣穴(堤体内部に空洞が広がる)は, 堤体浸透(堤体パイピング)破壊助長すると考えられるが,現地で浸透破堤の原因となった事実は確認されていない. 劣化の監視対象としての重要度を整理する必要がある(そもそも堤体土のパイピング現象が存在するのかも不明瞭).

課題認識(岡村先生) 主としてパイピング

- 欧米では1980年代後半から今日まで、この約40年間パイピングの研究が精力的に進められてきました。パイピングを起こしやすい砂の粒度、透水層の厚さ、堤体の幅(寸法)、等々が及ぼす影響について定量的に解明が進んでいます。
- この間の進展は構造検討の手引きに至るp.9の流れの中に全く取り入れられていません。山村さんの研究で時間が止まっているように感じます。100年前のレーンやブライでさえ粒径によってクリープ値が異なることを考慮しているのに日本では...
- →参考:1976土工指針案8章で、クリープ比はコンクリートとの境界に適用すべきもので「土堤では用いない」と明記。指標は裏法尻局所動水勾配とし、照査基準値には限界動水勾配 i_c を採用。1973種門樋管設計指針ではクリープ比を採用しているのに、意図的に使い分けたと推察される。その根拠が理屈のみだったのか・現地での試算結果に基づいて確信をもって使い分けたのか。→細砂のC=15、粗砂のC=12も3割のり面形状の堤防では満足するのが容易でないのに諦めたと思料します。のり先止水矢板設置・高水敷幅確保前提にして考えれば諦めなくてもよいのかもしれないと思料。
- 我が国では矢部川以降に複層地盤パイピング研究に注目が集まっていますが、複層はバリエーションの一つに過ぎないと思います。そもそも基本的な単層を優先するのが研究としては当然の進め方であり、欧米のパイピング研究も主流は単層地盤です。
- 上述した中で、堤防の寸法効果は重要です。堤防の敷幅が大きくなるにつれてパイピングが生じる動水勾配H/Lが小さくなってゆく現象です。実物の数十~百分の一のサイズの小型模型でパイピング実験を行うと、かなり大きなH/Lをかけないとパイピングが生じない。そうすると堤体内にも基盤から大きな水圧が作用する。加えて土の毛管上昇によって小さい模型堤体はすぐに飽和して法滑りしやすくなる。パイピング現象、毛管上昇、法滑り現象の相似率がそれぞれ異なります。これらの複合現象を考える場合には、小型模型実験はいわゆるゆがんだ模型にならざるを得ず、小型模型実験の結果はこれを十分認識したうえで解釈しなければいけません。日本ではほとんどなされていません。
- パイピング研究と日本の堤防の浸透点検・対策に関して課題は山積していると思います。

土層	ブライC		レーンC
泥土又は極微砂	18		8.5
細砂	15	細砂	7
	-	中砂	6
粗砂	12	粗砂	5
	-	細砂利	4
砂混じり砂利	5~9	中砂利	3.5
砂砂利混じり玉石	4	栗石含む粗砂利	3
		栗石と砂利含む	2.5

$$\text{ブライ } C \leq (\sum L_V + \sum L_H)/H$$

$$\text{レーン } C \leq (L+V)/H = (\sum L_V + \sum L_H/3)/H$$

課題認識(岡村先生) 主としてパイピング

- 我が国では矢部川以降に複層地盤パイピング研究に注目が集まっていますが、複層はバリエーションの一つに過ぎないと思います。そもそも基本的な単層を優先するのが研究としては当然の進め方であり、欧米のパイピング研究も主流は単層地盤です。
- 上述した中で、堤防の寸法効果は重要です。堤防の敷幅が大きくなるにつれてパイピングが生じる動水勾配 H/L が小さくなってゆく現象です。
- 実物の数十~百分の一のサイズの小型模型でパイピング実験を行うと、かなり大きな H/L をかけないとパイピングが生じない。そうすると堤体内にも基盤から大きな水圧が作用する。加えて土の毛管上昇によって小さい模型堤体はすぐに飽和して法滑りしやすくなる。パイピング現象、毛管上昇、法滑り現象の相似率がそれぞれ異なります。
- これらの複合現象を考える場合には、小型模型実験はいわゆるゆがんだ模型にならざるを得ず、小型模型実験の結果はこれを十分認識したうえで解釈しなければいけません。日本ではほとんどなされていません。
- 小高先生の縮小実験、加速度実験においてみられる堤体・地盤の変形・破壊現象(限界を超えると急激に変形が進行する、堤体土塊の重量を支える限界を超えると急激に変形が進行)は、矢部川・安八・小貝川豊田の終局時、国総研大規模実験の破壊現象で撮影・観察されている事象(のり崩れで急激に進行する、矢部川・国総研実験では水が噴き出すほど高水圧が裏法尻まで伝わる状態)をよく表現しているのでは? →「現地で観察された事実」を再整理する必要があるように思いました。
- パイピング研究と日本の堤防の浸透点検・対策に関して課題は山積していると思います。
- 地盤工学分野の中でさえコンセンサスには至っていない問題ですので、このような議論を通じて少しずつでも理解が進んでいくことを期待しています。
- 各実験で設定した条件において、生じた物理現象は実験事実です。信頼性の高い実験には、特に地盤の実験においては材料の状態調整や模型の作り方を含め精緻な技術と経験が必要です。小高先生の実験は工夫を凝らして丁寧に行われているので、私は信頼性が高いものと考えています。このような精緻な実験結果は数値解析や予測モデルの検証材料として使うのに有用です。模型で生じた物理現象を解析法は再現できる必要がありますから。
- 一方、実験結果が実物と対応しているかどうかは別問題で、実験で設定した条件次第です。当然ながら、相似則に従っていない縮尺模型実験の結果を、そのまま実物で起こる現象とみなすのは間違いです。パイピング現象の実験的研究で難しいのは、パイピング現象の相似率を合わせた縮尺模型実験を行うことが容易でないことです。これは重力場で行うか、遠心加速度場で行うかに関わらず、です。1g実験、Ng実験それぞれ長所、短所がありますが、パイピングについては何れも万能な実験方法ではありません。とはいえ、影響する無次元パラメータの幾つかをできるだけ合わせ、合わないものについてはその影響が顕著にならないように模型を設計することにより、ほぼ実物と同等とみなせる実験が場合によっては可能なこともわかってきました。研究は少しずつですが着実に進んでいます。
- 法面滑りの場合には、実物と模型が同じ材料できていれば相似則は明確です。堤体の粘着力 c がゼロならば、堤内浸透により生じる破壊現象は縮尺模型でほぼ正しく再現できます(1gでもほぼ良いですし、Ngならなお良い)。しかし c のある材料で寸法だけ縮尺した1g模型では破壊が生じませんので、Ngで行う必要があります。堤防法面滑りでは、たとえ砂を使って実験しても、毛管上昇により水分を含んでしまい(小さい模型ほど天端の方まで湿ってしまう)粘着力を有する材料になっています。したがって模型と実物で強度特性が異なる堤体を使って実験していることになってしまいます。

課題認識(岡村先生) 主としてパイピング

- ここは「直観」に頼っていて科学的でないとお叱りを受ける部分だとは思いますが、加速度実験にしても、小高先生の縮小実験にしても、基礎地盤の状態変化を受けての堤体変形の相互作用の現象としては、現場で起こっていることと違ってないという認識を私は持っています。ここも疑ってかからないといけないというご意見と理解すればよいでしょうか？
- 繰り返しになりますが、実物に近い現象が模型内で再現されるか否かは実験の条件次第です。簡単ではありませんがそこを見極めなければいけません。
- 相似則のことに悩まなくて良い実物大実験は魅力的です。研究が徐々に進むとわかつつもりになりますが、間違っていたというのはよくあることで、地盤工学分野では特にそうです。研究がある程度進展するたびに、それまでの理論や知見を改めて検証し足元を固めていくことは科学が進展するための必須のプロセスであり、State-of-the-artレポートを定期的に出すことはその一つです。国の研究はどうしても新しいものや現場に直結するテーマに意識が向いてしまうのかもしれませんが、基礎的事を含む研究を実大実験施設を用いて定期的に行うことは重要だと思っています。
- 実物大実験が本当に万能か、検討対象にしたい事象は何かも整理が足りないのかもしれない。石狩川、荒川、阿武隈川のように降雨だけで多数ののり崩れが起きる(現場で起きた事実)、堤防上を洪水時に歩くと振動している(たぶん基礎地盤が液状化しているのではなだろうか)等の体験談の現象は、堤防を専門とする技術者は解釈できている必要があるではないでしょうか(今後、設計超過現象も扱っていく必要があるので)。
- 降雨だけで崩れる被災は浅い表層腹付けのすべり以外見られなくなった。かつての撒きだし厚が大きくて結果的にゆるい施工だった堤防を築堤しなおしたわけでもないのに、変状・被災が生じなくなったのは、ゆるい施工の堤体も時間を経過すると強くなるメカニズムがあるのだろうか？
- 近年の品質管理出来ている施工法をあてはめて築造した大規模模型では、昔の土量節約コスト最優先の(ゆるい)堤防で起きる現象を観察できていないのではないのでしょうか？破壊・変形現象の何を説明したいのか改めて、目的別に整理する必要があると気づきました。
- 関心も立場によってバイアスがあると思われます。設計法や照査法確立を目指している者は、変形破壊現象そのものは必ずしも扱わなくて良い。昔の破壊現象を解釈するインセンティブも働きにくい(現状の設計・施工を前提にした問題に関心があるので)。一方、直観に頼って全体ばかり追いかけしていると、基礎的な部分の確認・検討手法の限界確認・詰めをおろそかにしがち。

課題認識(岡村先生コメント踏まえて)

- 裏法崩れは、砂質土堤体の実物大実験で円弧すべりではなく泥濘化・塑性流動によって小規模の崩壊が繰り返される現象であることが観察されている(石原ら)。すべり安全率一定以下の範囲と崩壊範囲が一致するので実務上慣れ親しんだすべりとして扱うことが実務上有益としている(石原ら)。
- →粘性土のり崩れは泥濘化・塑性流動だけだろうか？粘性が強いとあるいは破堤終局時の崩れ方は堤体・いくつかに割れた土塊が移動しているパターンが多いのではないだろうか。(わざとパイピング空洞を形成されやすくする)実物大実験、ルーフィング破壊では空洞の貫通から空洞拡大というプロセスも観察されている。
- →裏法崩れに代表される堤体変形の区分はあるのだろうか。区分は関係者間の共通認識になっているのだろうか(広義パイピングとも関連している)。
- →山村さんが当時の現場経験・被災調査検討経験・実験経験を踏まえて設定してくれた「ゆるい盛土」前提を、超過洪水対応の減災検討にも踏襲し続けるのか(締固めが効いた堤体土部分がある前提の実験・解析・変状予測が必要ではないのか)？当時見られた降雨による浸潤面上昇でのり崩れを起こす変状の被災後復旧において、締固め・品質管理された施工法で、ドレーン設置・のり先止水矢板設置等による強化がなされているのではないかと推察される。なお、計画高水位以下の保証範囲では現行の設計哲学を踏襲した整理は継続するのではないだろうか(最低限の保証水準まで仕上げることは義務と考える(私見))。
- →材料力学(歪・変形と応力関係を有限要素法でモデル化)による表現で、浸透破堤に至る、浸透→歪・応力場変化→塑性変形・ひび割れ・複数土塊分裂→側方流動・土塊移動・流失の応答変形プロセスのうち、どこまで表現できている・守備範囲なのか、は共通認識できているであろうか。
- 設計は、きっかけになる現象が起きるかどうかで判定する考え方が一般的なので、全てのプロセスは追わない(追う必要がない)。→「減災」局面では、きっかけだけでなく破堤までのプロセス全体を見たい・理解したい
- 現場の破堤時の観察、破堤に至らず変形・変状で済んだ事象、実物大実験での観察について、共通の事実関係整理・現象解釈が必要なように思われる。並行して、現在主流になっている材料力学的な(歪-応力関係)モデルで表現可能なフェーズ・事象と、歪-応力関係のみでは表現できないフェーズ・事象を区分する必要があるのではないだろうか。共通認識形成までいけるとさらによいと思う。
- “経過監視でよい”噴砂の見極め・共通認識化，“経過監視でよい≒破堤に至らない”のり崩れの見極め・共通認識化、のためにはそれ以上進行しない「裏付け」を力学的に説明したいところ。経験則で説明する方法もありかもしれないが、水防活動・災害復旧等の目安にしている経緯から、勇気がいる。
- 越水なき浸透破堤に至った主な事象・イベント(安八、矢部川、T川、小貝川豊田等)については、被災後に整理された検討報告とは別に、なぜ起きたのかを説明する有力仮説提示をしつこく行う必要があるように思う。土堤はそれなりに強いものであり、破堤は特異な場所で発生するという前提に立った場合、「特異な状態」を納得感を持って説明しなければいけないので。現行の設計法や照査法で確認する方法ではなく、実際の堤体物性(設計概念上採用している「ゆるい締固め前提」ではなく、実際の強度・変形特性)を表現できる計算で検討するのではないだろうか。

課題と思われること(田端意見)

【有効応力の低下】

- ・ 現行の照査では評価できていない場合が多いと思われ、実務では対応を必須とするように改善していくべき。
- ・ p.4のフローにあるように、有効応力低下が、せん断強度・粘着力低下、砂層液状化を引き起こすため、危険箇所を推定する上で重要。
- ・ 土の塑性変形が起きない(弾性体として釣り合った状態)とすると、間隙水圧の変化に伴って有効応力(およびひずみ)も変化しているはずであるが、現行の照査では単に土の自重と間隙水圧のみから評価できる指標をもってチェックする枠組みになっている。
- ・ そのため、浸透流・地盤内応力の練成計算などを積極的に導入していくべきと考える。有効応力を考慮した場合としない場合での結果の違いを提示し、課題を共有することも必要と思われる。
- ・ →新清さん、初歩的なのところがわかっていないので教えてください。過剰間隙水圧(非静水圧分布)が生じる場合に有効応力が重要なのか、過剰間隙水圧が生じなくても有効応力が重要なのか理解ができていません。
- ・ →私は(のり崩れのきっかけ・貫通が起きる)砂層だけが問題と単純化して捉えています、田端さんは堤体土も過剰間隙水圧が生じているはずで堤体土の評価も重要と考えているところに違いがあると思いました。

【有効応力低下 → せん断強度・粘着力低下/砂層液状化 の具体の評価法】

- ・ 仮に有効応力低下が把握できたとしても、そこからせん断強度・粘着力低下/砂層液状化 をどう評価するのか が課題。
- ・ せん断強度は有効応力に比例するので、直接反映可能と思われるが、有効応力と粘着力の関係はよくわかっていないのではないかと。(図説河川堤防p.23に、飽和するとシルトで強度が1/3程度まで低下することが示されているがこういったものとも関係するのか。)
- ・ 砂層液状化も同様、よくわかっていない。具体の評価法、そのための試験法が課題と思われる。
- ・ →私は液状化状態と考え土質試験をせずとも強度0として変形計算を行えばよいという提案。田端さん・小高先生は強度を評価することが重要という問題提起。

【盤ぶくれ 噴砂】

- ・ p.4で整理されているように、盤ぶくれは「浸潤面上昇・間隙水圧上昇」のみに起因するものとして実務上はG/Wで評価されるが、実際は土重量と揚圧力の不均衡だけでなく、鉛直方向せん断力の低下(←有効応力の低下に起因)も関係するのではないかと。
- ・ ↑鉛直方向せん断力が私は理解できていない。鉛直方向の変形に抵抗するせん断強度・抵抗力を考えると限界状態は $G/W > 1$ ではないかという問題提起でしょうか？

【空洞発達、パイピング】

- ・ 盤ぶくれ、噴砂の発生が評価できたとして、その後、空洞発達・パイピングが進むか否か をどう判断するのか？も課題となる。
- ・ →現状は「きっかけ」である噴砂発生懸念や盤ぶくれ発生を限界状態としていると解釈できる。
- ・ →大型実験を見ていると進行速度が遅い早いはあるが、「パイピングが進まない」という状態は想像しにくい。
- ・ →変形や圧力分布変化でパイピングに対する安全性が高まる状態(局所動水勾配が緩くなると想像するが)がイメージできてない。共通認識とするためには仮説としてのイメージ図が必要と思われる。
- ・ 有効応力の低下は、ひずみ変化(=空隙率の変化)をもたらすので、結果的に透水係数も変化するものと思われる。上述の浸透流・地盤内応力の練成計算にあわせて、噴砂発生後の砂粒子の連行→粒度構成比率・空隙変化→透水係数変化→流れ・有効応力への反映・・・を表現できるモデルができれば、問題解決に一步近づくのではないかと。(前者は地盤工学、後者は水工学的な発想が必要で、両者の連携・意見交換が重要になると思料)
- ・ →中島さんの応用地質のレポートでは砂粒子連行とは1つの砂粒が出口まで到達する状態(単粒子沈降速度を上回る状態)としていた(鉛直方向流れでの実験)。
- ・ →流速が大きくなると雲みみたいな浮遊乱流状態の砂粒集団領域が増えることを報告している(体積増大とも解釈できる)pdfのp23~p25。
- ・ →噴砂山は液状化した砂層が歯磨き粉を絞り出すように出てきたと考える人もいる(私もそれに共感するところがある)。

洪水応答（浸透）

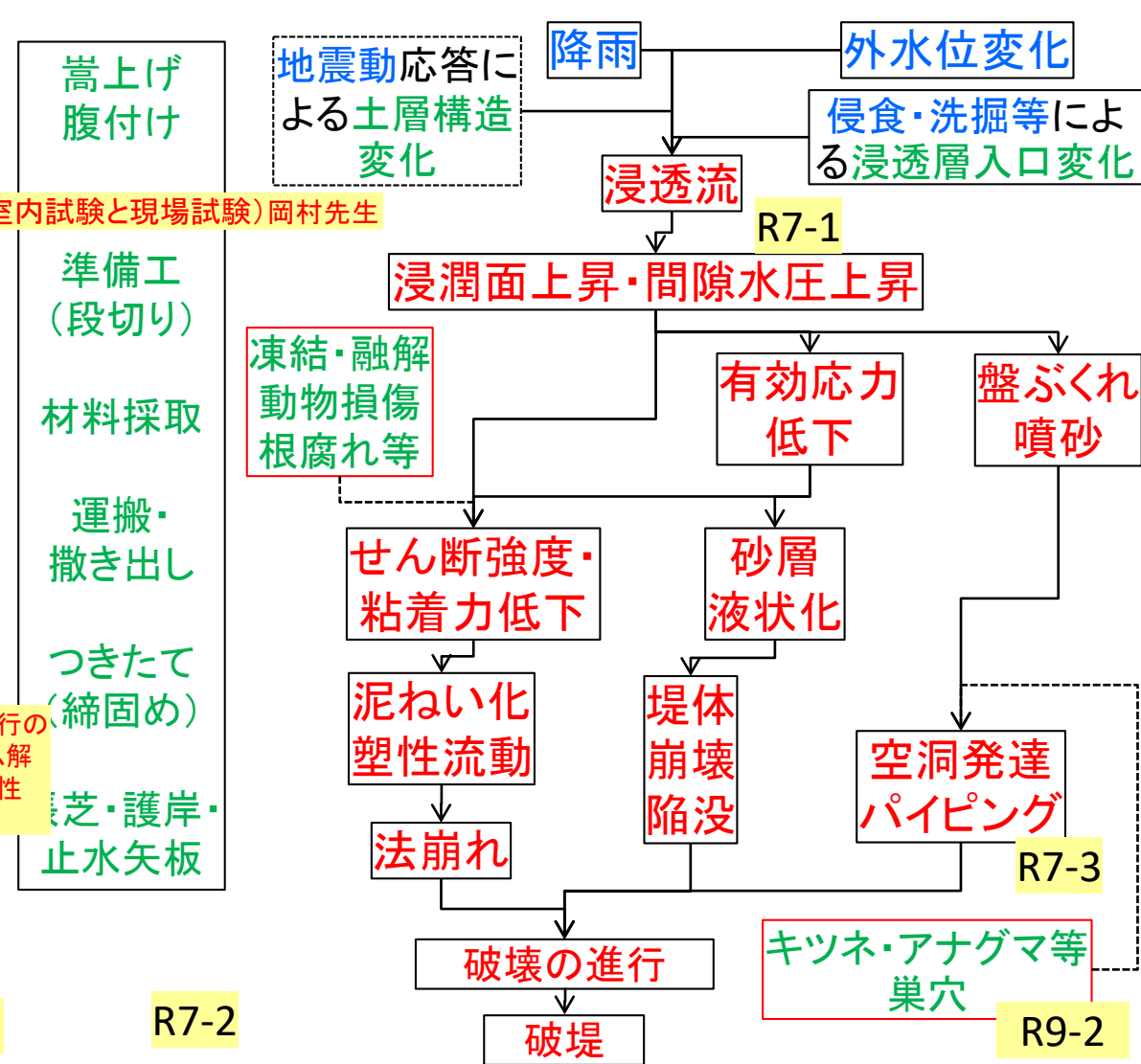
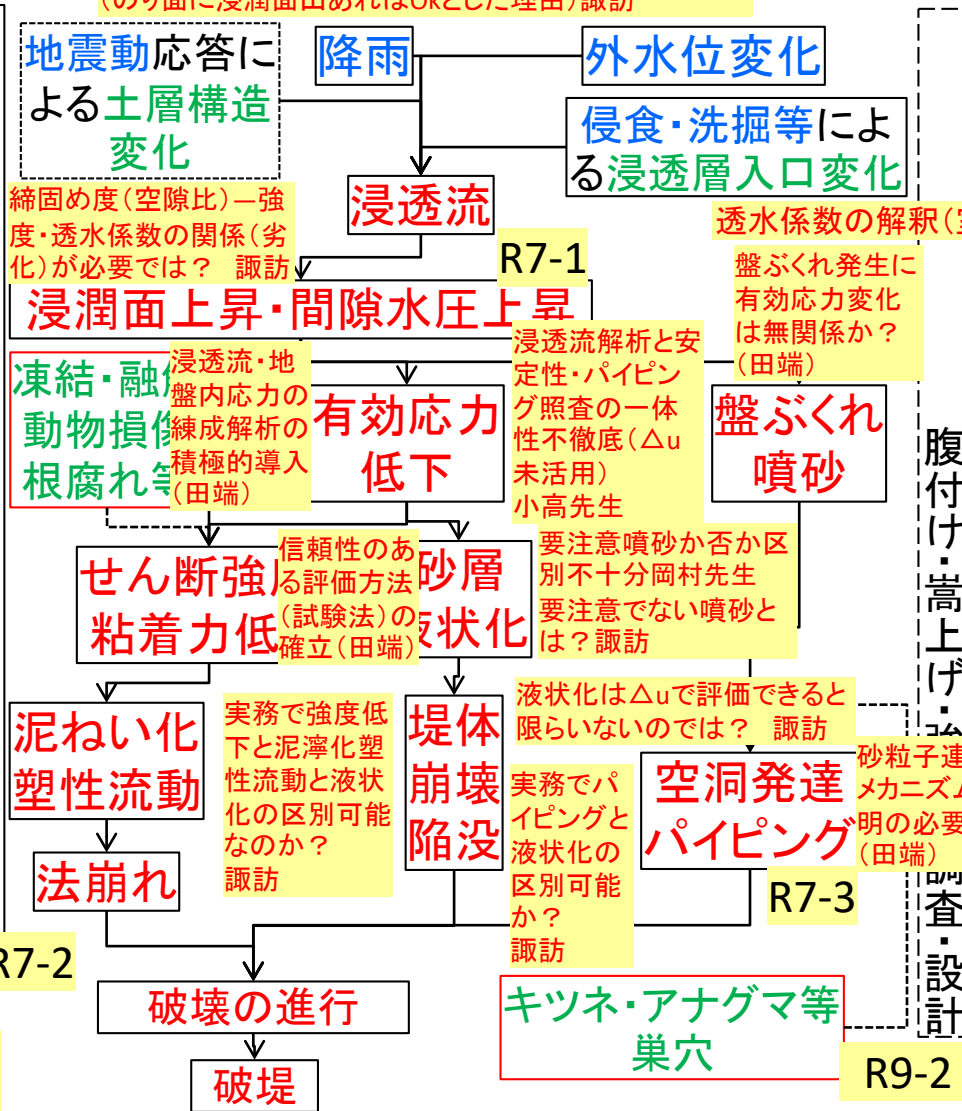
降雨外力は用いています（新清）→実波形や計画降雨波形は用いないと理解。降雨量が多いと発生するというのが山村さんや中島さんの整理。この割り切りのまま行くのがよいのか？（諏訪）

自重・上載荷重

降雨量を外力に反映しなくなった理由深掘り必要では（のり面に浸潤面山あればOkとした理由）諏訪

沖積（河道変遷・土砂堆積・地盤形成）
築堤工事の調査・設計

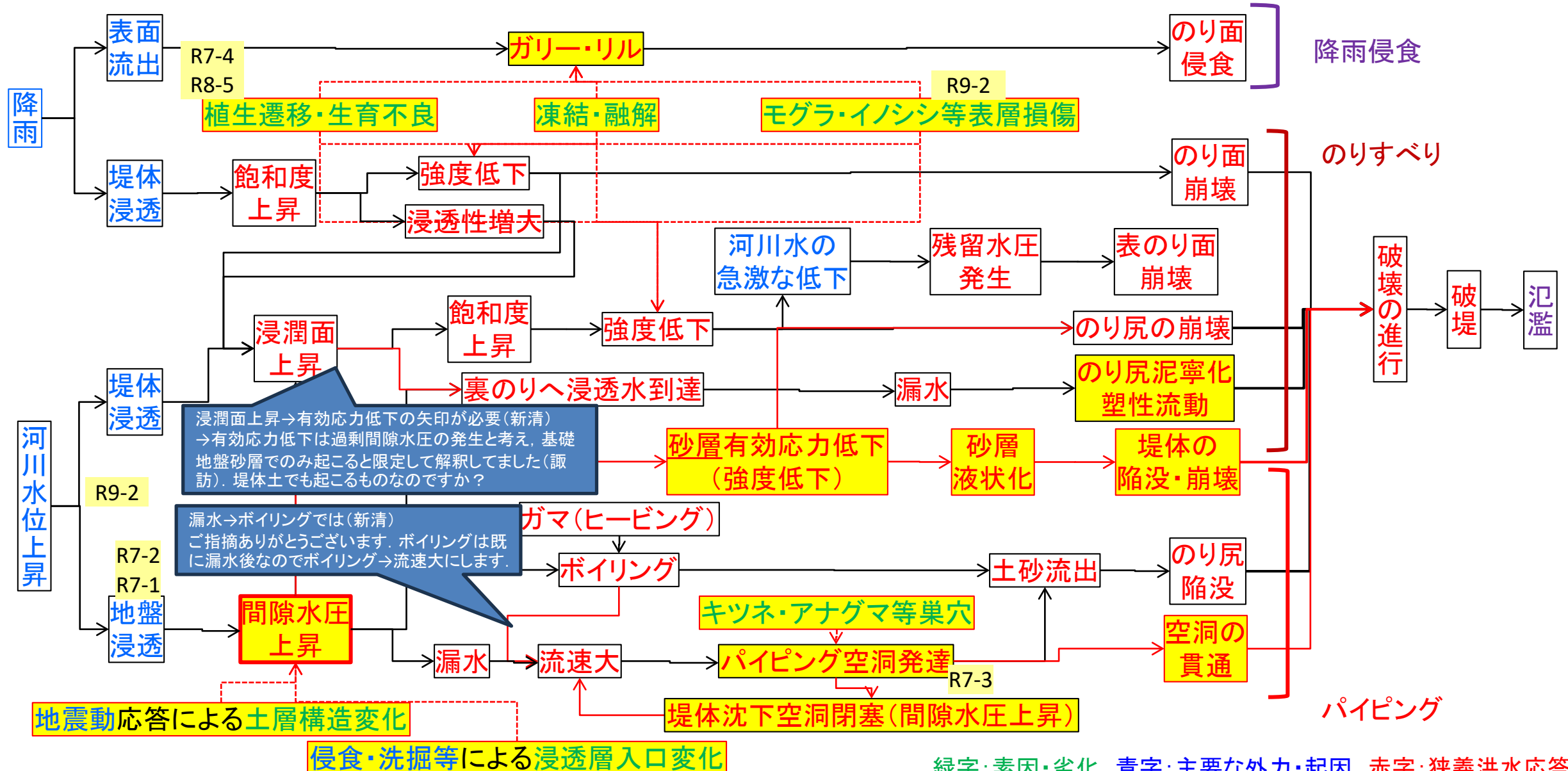
- 盛土・築堤
- 準備工（敷き均し不良地盤置換）
- 材料採取
- 運搬・撒き出し
- つきたて（締固め）
- 張芝・護岸・止水矢板



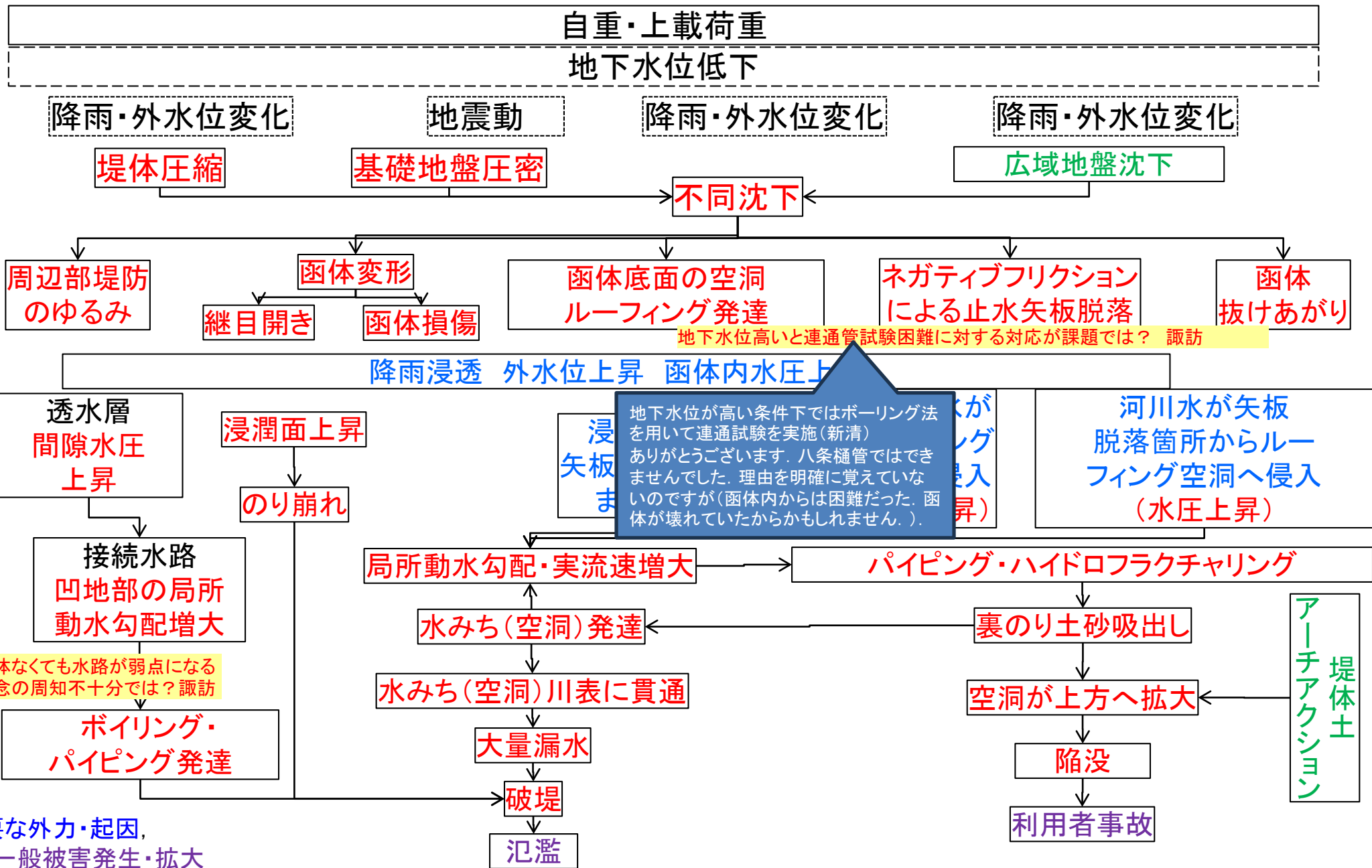
施工法: 長期沈下・周辺影響 (軟弱地盤)
浸透: 要注意地盤か否か
耐震: 液状化

緑字: 素因・劣化, 青字: 主要な外力・起因,
赤字: 狭義洪水応答, 紫字: 一般被害発生・拡大

降雨・河川水の浸透による河川堤防の被害の発生過程



樋門周辺不同沈下と浸透応答



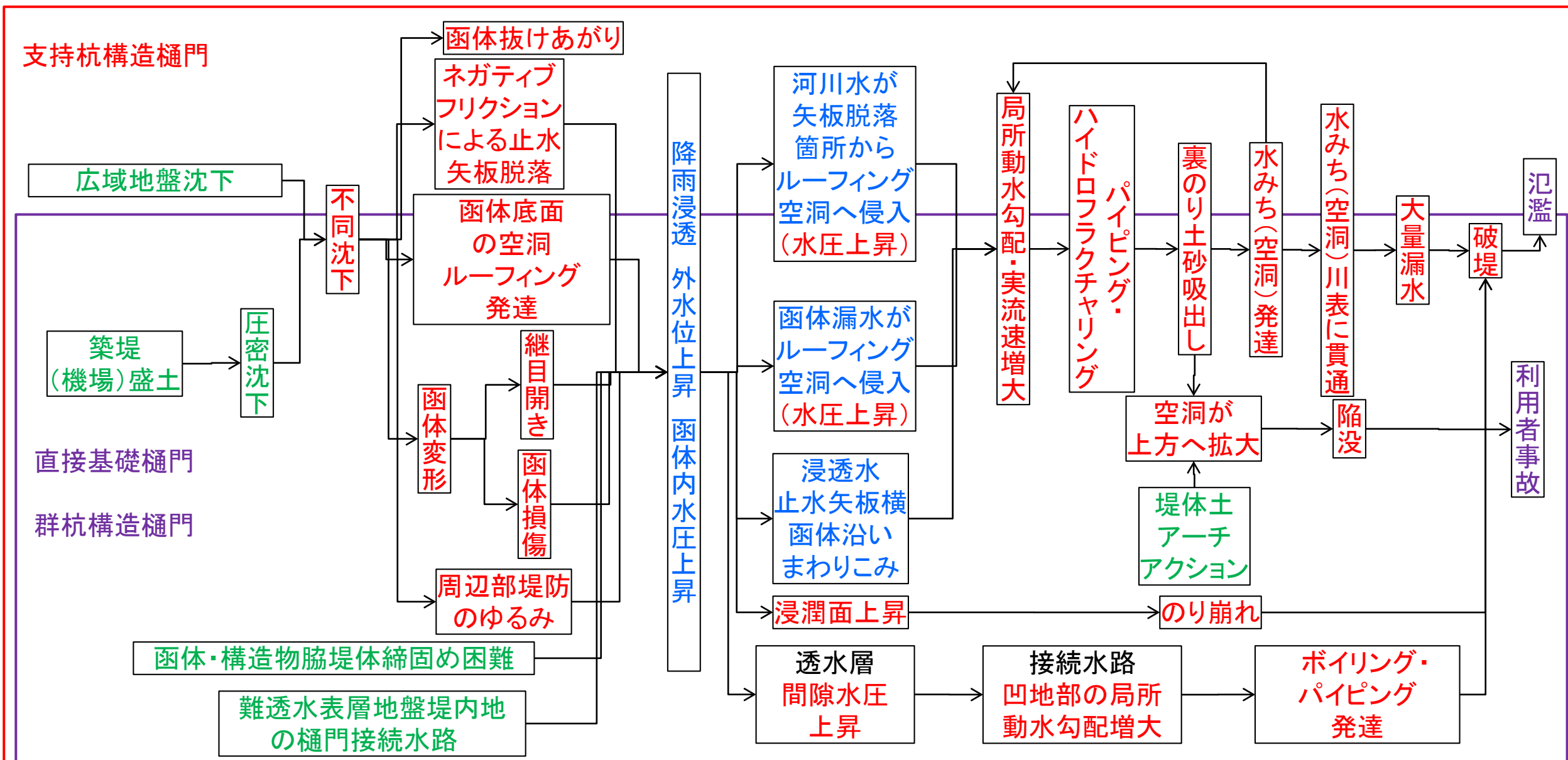
沖積(河道変遷・土砂堆積・地盤形成)

樋門・樋管・築堤工事の調査・設計

- 盛土・築堤
樋門設置
- 準備工
(敷き均し
不良地盤
置換)
掘削
杭打込み
止水矢板
函体設置
- 材料採取
- 運搬・
撒き出し
- つきたて
(締固め)
- 張芝・護岸

緑字: 素因・劣化, 青字: 主要な外力・起因,
赤字: 狭義洪水応答, 紫字: 一般被害発生・拡大

樋門周辺不同沈下及び浸透破壊の発生過程



緑字: 素因・劣化, 青字: 主要な外力・起因, 赤字: 狭義洪水応答, 紫字: 一般被害発生・拡大

現場観察、大型実験事実、加速度実験事実、小規模実験事実

	きっかけ	変状拡大時	終局時
現場(破堤観察) ※:山村和也講演集「河川堤防の災害と現状認識について」(1996)p2~p5 ※※:新河川堤防学(吉川2011)p64	O川:記載なし 矢部川:発見できていない 安八※:破堤6時間前裏小段に若干のすべり発生 小貝川豊田(摩擦支持杭樋管) ※※:川裏翼壁横で漏水発生 T川:パトロールするも発見できず	O川:記載なし 矢部川:発見できていない 安八:水防活動(杭を打ち竹や針金で縛る工法)実施. 堤体が柔らかく杭が簡単に入る状況. 小貝川豊田:水防活動(川表シート張)、川裏漏水量増大→堤防天端に亀裂発生→堤防陥没 T川:パトロールするも発見できず	O川:破堤直前に大量の水を裏法尻から吹き上げていた(平均的L/H場とかけ離れた被圧状態に). 堤防が縦断方向に弓形に沈下し(残留堤体土塊の下の土層が抜けた)、直後に横断方向に堤体が落ち込み(側方流動)、水が噴き出し決壊 矢部川:法尻から水が噴き出す(噴き出す高さは1mという証言と2mという証言がある. 平均的L/H場とかけ離れた被圧状態に) 安八:小段の付け根で1次すべり発生. すべり土塊上の人の証言:エレベータに乗っている調子で下がった(急激な変状進行). しばらくのちに天端含む2次すべり発生. 天端に駐車していた消防車が巻き込まれ1名亡くなられた. 80m幅破堤. 小貝川豊田:堤防天端に亀裂発生→堤防陥没→押し出すように堤防決壊→越流水で川表水防資材流失→完全に決壊(破堤幅拡大) T川:堤体上部が沈下(残留堤体土塊の下の土層が抜けた)・流失
現場(変状発生破堤至らず)			子吉川: 梯川:
大型実験(パイピング・堤体砂質土締固め)破堤	噴砂	外観からは特段の現象なし 砂層堤体境界面カメラ観察:礫層からのポイリング(砂層流動)観察される	側壁沿い:水が噴き出し、土塊の亀裂拡大・のり崩れ 砂層堤体境界面カメラ観察:堤体土と砂層の境界に平板間流れ
大型実験(三木ら)	噴砂穴:漏水→漏水穴で砂流動 砂層:特になし	砂層:透水係数増加(漏水量- Δh 傾き増加)	空洞が貫通し急激に拡大. 漏水量も急激に増加
大型実験(泥濁化・塑性流動繰り返し、堤体土砂)	浸潤面裏法尻到達	泥濁化・塑性流動による小規模崩れ繰り返し	—
加速度実験 (第6回堤防技術シンポの堀越らのプレゼン見た記憶から記載)	水みち空洞が裏法尻から発達	水みち空洞が表のり側へ、分岐する場合も(水みちは砂層全体に均等に発生しているわけではない)	水みちが川表側まで貫通して川表水位低下
抽出実験(中島ら)	局所的ポイル発生	砂層体積増・砂粒流動	一砂粒が出口に運ばれるようになる(終局とは言えないのでは)
抽出実験(前田ら)		水みち空洞川裏側から川表側へ発達 透水係数>理論透水係数	水みち空洞が貫通
小規模実験(小高ら 広義パイピング)	法尻に有効応力低下領域発生→裏法尻小規模すべり	法尻の有効応力低下領域拡大→裏のりすべり拡大	越流発生→破堤
小規模実験(小高ら 教義パイピング)	噴砂発生, 裏法尻堤体と砂層境界に水みち空洞発生	堤体と砂層境界の水みち空洞が表のりに向かって発達	水みち空洞が貫通→堤体沈下→越流発生→破堤

近年確認できる堤防浸透研究の流れ

- 流下能力チェック,侵食安全性とともに河道と一体で堤防・基礎地盤浸透も設計することを目指す流れ(福岡先生ら)
- 相対的に遅れているパイピングを対象を絞り込み, (縮小実験・加速度実験含めた実物大実験等をもとに)パイピング現象・漏水現象の解明(見落としてはいけない変状と経過観察で済む変状を見分ける)を目指す流れ(岡村先生ら、前田先生ら)
- 土質性状・強度評価をきちんとした試験・理屈(締固め一強度関係, 変形一強度関係)で評価し, 土質力学に則った堤防設計を目指す流れ(小高先生ら)
- 堤防の構造検討の手引きの記載内容を補完する・延長上に伸ばす研究の流れ(前田先生らによる止水矢板のパイピング軽減効果評価, 3次元測量を活かした現地の変状把握・評価も含む)
- 堤防整備と被災・変状の特徴変遷(降雨のり崩れの減少要因, 主な浸透破堤(小貝川豊田, 長良川安八, T川, 矢部川, 大規模実験)の力学的解釈)を力学的に技術進歩(施工管理・特に締固め管理の改善・意識向上(土量極小化重視から品質管理(締固め度)重視へ, 高撒き施工避ける意識の浸透, 越水なき破堤発生を受けてのり崩れ等変状を許容しない方向に, 耐震補強が結果的に浸透補強にも効果発揮), 表法先止水矢板導入の効果(鉛直方向浸透路長確保には大きな効果と推察される), ドレーン導入の効果等)として解釈・裏付けをし, 今後向き合わざるを得ない設計超過外力時の洪水応答評価を目指す方向(諏訪の問題提起)
- 今後は施工効率性に加え, 現地で発生する事象の解釈能力・説明能力が重要に(外挿が重要, 整備完了時評価に加えて整備途上時点の評価が重要, 被害・影響を被る人からの「信頼」が重要になるので.).
- 29巻では樋門・樋管周辺を扱う投稿はなかった.

2. 浸透研究の脈絡に関する認識比較

- 現在、堤防の技術について集約されているのは、堤防構造検討の手引き。
- 手引きにまとめるまでの脈絡を知ることができるものとして以下を挙げる。他に重要な文献等あれば追記お願いします。
- 河川堤防の土質工学的研究(山村1969):降雨変状、浸透破壊、**破堤原因**
- **山村和也氏講演集「河川堤防の災害と現状認識について」(1996 国土技術開発センター):河川堤防技術開発の経緯、大型実験と現場堤防変状の関係、堤防の技術哲学**
- 図説・河川堤防(中島2003):山村含む包括的まとめ(樋門も含む)、**パイピング限界流速**
- 河川堤防の漏水対策技術(第3版)(瀬川2004):石狩川漏水変状,軟弱地盤樋門、**石狩川下流における破堤・変状原因**
- 新河川堤防学(吉川2011):樋門周辺の重要性、**一連区間としての堤防システム**
- 河川堤防の技術史(山本2017):1976土工指針案の重要性(施工含めたトータル)指摘 **ただし土工指針案には天端高管理・流下能力管理等の記載はなさそう(流下能力は河道計画)**
- その後、施工と調査・設計が分けられ、それぞれで技術開発・調査研究等が進められている。 **流下能力は「河道計画」、構造は河砂設計編・堤防強化マニュアル案等、施工は土工マニュアル**
- 例えば、降雨検討が不要となった脈絡を整理・情報共有しておきたい。私見としては、気候変動等で外挿が必要な時代になり、降雨検討は再度スキップしてよい事象か否か整理が必要と考える。→設計としては、**表裏ののり面下に山ができる「ふた山浸潤線形成」が重要という考え方。現在の推奨手法は、表・裏のり面に山ができるふた山浸潤線形成が可能な降雨時間波形を設定していると解釈(計画降雨波形とは関係なし)。**
- 他に脈絡を再整理すべき対象について意見をお願いします。
- **パイピング研究としては、ブライ・レーンの時代でもクリープ比を粒径別に細分するアプローチをとっているが、日本では山村さんも中島さんもその道を選ばなかった(岡村先生コメントを諏訪が意訳)。参考:1976土工指針案8章で、クリープ比はコンクリートとの境界に適用すべきもので「土堤では用いない」と明記。指標は裏法尻局所動水勾配とし、照査基準値には限界動水勾配 i_c を採用。**
- **パイピングと変形(のり崩れ)の境界、のり崩れでは Δu と別に砂層液状化考慮は必要ないのか**
- **単層水圧上昇見逃していないか(既往浸透災害では単層もある)**

堤防浸透に関する技術系譜(私見)

- 山村和也さん:東北地整築堤現場での施工実態見ている。阿武隈川での全川にわたる裏のり小段亀裂変状を堤防の地下水位・圧力観測時に実体験。実験室内での大型盛土実験・淀川等現地盛土実験における裏のり戻すべり再現の試行錯誤。木曾三川の堤防裏のり変状で阿武隈川と同じメカニズム再確認。河川堤防は「ゆるい盛土」・降雨による裏法戻での浸潤面上昇で変状発生、そのあと来襲する外水位浸透で変状が拡大する堤防変状の基本プロセスを確信。腹付け・高上げで補強してきた河川堤防の過去のゆるい盛土は変えられない前提で、堤体内裏のり浸潤面を低下させることを基本と考えていた。標準断面(計画堤防断面)を基本としつつ相対的に弱い場所を掘り下げて調査検討し強化する哲学・方針(現行の河川堤防設計の哲学)を示した。円弧すべりによる検討、浸透流解析には限界があると感じている(現地で起きる事象を再現・説明するというよりも、あくまで強化設計の道具と割り切って考える立場と推察する)。
- 中島秀雄さん:山村さんの基本哲学を踏襲しつつ、パイピングについて海外文献レビューや抽出実験でのX線撮影、浸透流解析を駆使して研究し「限界流速」を整理・提唱。樋門・樋管の現場変状調査の経験とともに、工法や技術基準類変遷から抜けあがりによる変状発生要因も整理し著書において注意喚起。堤防構造検討手引きにも深く関わっている((使いやすい・それまでの方法との連続性を重視する現場技術者用)設計論である構造検討手引きには限界動水勾配とG/Wが採用。「限界流速」は参考資料掲示。本意ではなかったのではないかと推察する)。
- 吉川勝秀さん:河川局での防災対応・国会対応・訴訟対応、現場事務所勤務等の立場から河川堤防に関わる。行政経験も知る技術者として堤防の課題や方向性を考える。堤防について構造だけでなく上下流方向の一連区間システム論として論じようとしている。自身が事務所長を務めた小貝川で見られた樋門周囲の不同沈下弱点破堤の教訓・知見について、瀬川さん(泥炭地軟弱地盤の石狩川堤防と樋門について調査・研究)とも連携しつつ注意喚起。堤内地側の旧川・落堀跡についても安八水害の訴訟対応経験踏まえて懸念し著作の中で注意喚起。

好循環形成の障害

2/3基準・マニュアル類信奉の落とし穴

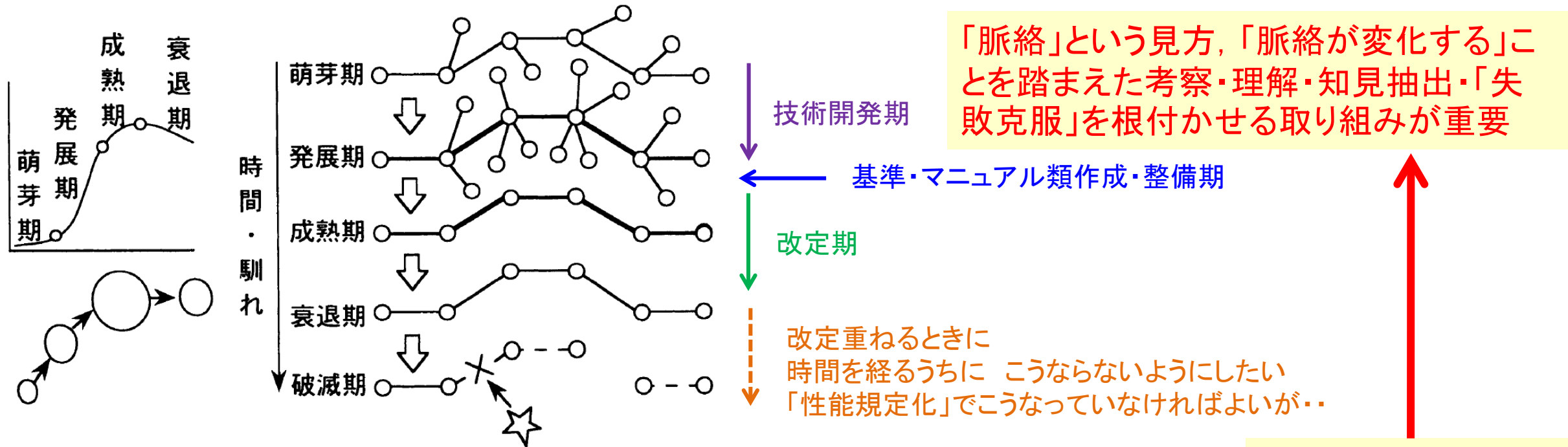


図6 経済性追求による失敗の必然性

技術の成熟に伴って脈絡は変化する。成熟期になると選択枝は切り捨てられ、メインのルートだけが許され、ひ弱なルートになり、破滅する。

河川部会は、「脈絡」の整理・共有を大切にすべき！

「脈絡」を整理・把握する方法は、失敗克服だけでなく、技術開発、成功要因分析でも有効。

出典: 畑村洋太郎: 失敗学のすすめ, 音声言語医学, Vol.43, pp.182-188, 2002 に加筆

好循環形成の障害

2/3基準・マニュアル類信奉の落とし穴

基準類で表現できない

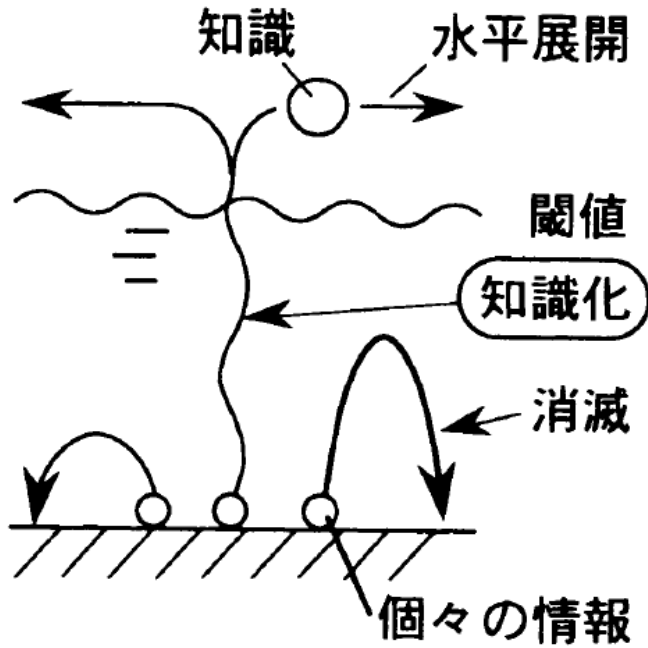
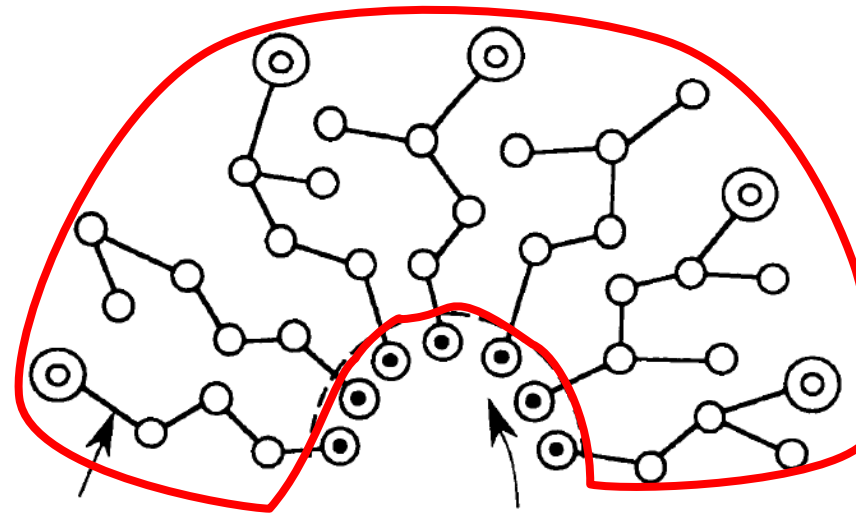


図8 失敗情報の知識化の必要性

情報のままでは伝わらない。
知識にして初めて伝わる。

基準類で表現できない



表現されていない失敗の脈絡

結果として表現されているもの

図9 失敗に至る脈絡伝達の必要性

失敗の結果だけでは何も伝わらない。
そこに至る脈絡を記述して初めて伝わる。

人は理解しなければ(失敗(成功))知識を使うことはできない。結果だけが表現されていても理解はできない。失敗(成功)に至る脈絡(どのようなことに迷い、どのようなことを試し、どのような失敗(成功)をしたかについて記述)が記述されてはじめて理解することができる。

それにはまず、事象・経過・原因・対処(その失敗(成功)の進行にどのように対応したか)・総括などの項目に従って記述することが必須である。

そしてこれらを知識化する必要がある。更にこの失敗(成功)に対して行った対策・失敗(成功)の起こった背景・この失敗(成功)の後日談、またこの失敗(成功)に関連して思い浮かんだ四方山話などを記すことが非常に有効である。

堤防技術の変遷(越流除く)

法律等

浸透関係

樋門等との接続部

耐震

侵食

直轄河川:大規模機械を用いた河道改修・築堤
補助河川:人力施工による河道改良・築堤⇒重機施工へ

水制による河岸制御から
護岸・根固めによる直接防護へ

河川法改正(1964)
加治川水害(1967)
大東水害(1972)
河川管理施設等構造令
(1976)

河川堤防の土質工学的研究(1969)
樋門・樋管設計指針(案)(1973)
河川土工指針(案)(1976)

新潟地震(1964)

十勝沖地震(1968)

異型ブロックの普及

多摩川水害(1974)

安八水害(1976)
常呂川・筑後川浸透実験、降雨実験(強化確認)
石狩川堤防のり崩れ被災多数(1981) 小貝川高須樋管破堤(1981)

宮城県沖地震(1978)

根固めブロックの移動限界流速評価(案)
(1980)

大東水害最高裁判決(1984)

河川堤防強化マニュアル(案)(1985)
江戸川堤防降雨・浸透実験 河川構造物等の軟弱地盤対策工法委員会(1986~1988)

河川堤防耐震対策検討委員会(1981~1984)

日本海中部地震(1983)

多摩川水害差戻し控訴審判決(1992)

河川土工マニュアル(1993)

地震対策堤防強化計画策定マニュアル(案)(1991)

柔構造樋管試験施工

釧路沖地震・北海道南西沖(1993)

河川堤防耐震点検マニュアル
(1995) 阪神淡路大震災(1995) 堤体土・高水敷土実物大供試体侵食実験

粘性土・植生根毛の耐侵食性評価(案)(1997)

河川堤防の浸透に対する安全性の概略点検(1996)

河川砂防技術基準設計編(1997)

ドレーン工設計マニュアル(1998)

護岸力学設計法(1999)

河川法改正(1997)

改定 解説河川管理
施設等構造令(1999)

河川堤防の構造検討の手引き(2000)

樋門等構造物周辺堤防点検要領(2001)

河道計画検討の手引き(2002)

堤防設計指針(2002)

河川堤防質的整備技術ガイドライン(案)・河川堤防モニタリング技術ガイドライン(案)(2003)

柔構造樋門設計の手引き(2008)

床止め工構造設計の手引き(2008)

河川法一部改正(2013)

河川管理施設点検結果評価要領(案)堤防護岸点検結果評価要領(案)(2015)

河川砂防技術基準設計編(2019)

堤防浸透災害降雨のり崩れの減少要因

1956	阿武隈川下流(ΣR 不明)多数
1958	阿武隈川下流($\Sigma R=256.5\text{mm}$)多数・荒川下流(東京 $\Sigma R=400.3$)多数
1961	木曾・長良・揖斐川($\Sigma R=590\text{mm}$)多数
1969	河川堤防の土質工学的研究
1974	多摩川水害(越水なき破堤)
<u>1976</u>	<u>河川土工指針(案)</u>
1976	安八水害(越水なき破堤)
1981-1982	常呂川・筑後川浸透実験
1983	降雨浸透実験
1985	河川堤防強化マニュアル(案)
1986	阿武隈川下流($\Sigma R=422\text{mm}$)16件・石狩川($\Sigma R=410\text{mm}$)55/61件 小貝川高須樋管破堤
1986-1988	江戸川堤防降雨・浸透実験
1993	河川土工マニュアル
1998	阿武隈川下流($\Sigma R=284\text{mm}$)0件

<参考>堤防既往研究・図書

- 山村和也(1969):河川堤防の土質工学的研究, 土木研究所資料, 第688号, 1969
 - 山村和也氏講演集「河川堤防の災害と現状認識について」(1996 国土技術開発センター)
- 中島秀雄(2003):図説 河川堤防, 技法堂出版, 2003年9月
 - 瀬川明久(2004):河川堤防の漏水対策技術(第3版), (財)北海道河川防災センター, 2004年8月
 - 国土技術センター編(2007):改定・護岸力学設計法
 - 国土技術センター(2012):河川堤防構造検討の手引き(改訂版)
 - 山本晃一(2017):河川堤防の技術史, 公益財団法人河川財団企画, 技法堂出版, 2017年10月
現基準類の解説書
- 福岡捷二(2006):洪水流の水面形観測の意義と水面形に基づく河川の維持管理技術, 河川技術論文集, 第12巻, P.1-P.6, 2006年6月
 - 吉川勝秀(2011):新河川堤防学 河川堤防システムの整備と管理の実際, 技法堂出版, 2011年11月
施設能力超過洪水

アンダーラインは、基準類整備過程で切り落とした脈絡(例えば, 降雨影響, (大規模)実験の技術・哲学, 土工重要性, 樋門・樋管)を掘り起こすことができる可能性がある文献

小高ら(2018)の分類

〇川
 矢部川
 国総研大型実験
 (水の吹き出し観察)

安八
 小貝川豊田
 (水の吹き出し観察されていない)

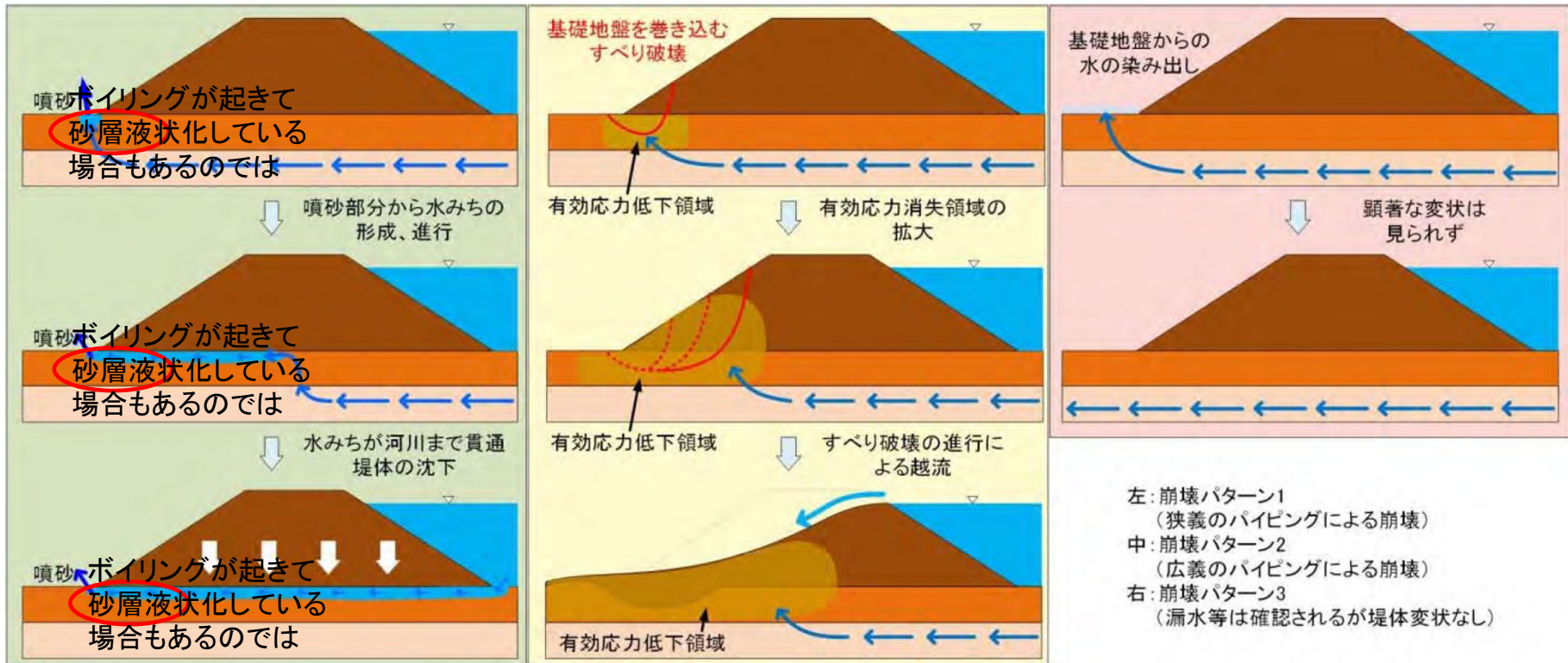


図-9 高透水性基礎地盤を有する堤防の3つの崩壊パターンへの類型化

出典: 小高ら、高透水性基礎地盤を有する河川堤防の崩壊メカニズムと評価手法に関する研究、河川技術論文集、第24巻、2018 に加筆

山村さん講演集より

- これ(スライド2)は破堤が起こる約6時間ぐらい前でございますが、堤防の裏小段に若干のすべりが発生した。それで付近の水防団の人が見ておるのですが、まだそれほど切迫感はありません。通常の水防活動のための杭を打って、あと針金と竹で絞るんですが、籠止めというんですかね、そういう工法をやっております(スライド3)。かなり堤防が軟らかくてこういう杭が中に入ったという風に聞いております。
- これ(スライド4)はもう最終的に破堤した状態です。その前にここにちょっと見えにくくなっておりますが、1次崩壊が小段の付け根に発生したわけでありまして。この1次崩壊が突然起こったわけです。水防活動をやっている人を乗せたまますべりが発生したというふうに聞いております。その時の人の話を聞くと、ちょうどエレベーターに乗ってる調子で下がりましたと聞いておりましたから、かなり早くすべったようであります。
- 1次崩壊が起こった後しばらくして2次崩壊が発生しました。その時堤防の上に消防自動車が止まっていたんですが、その消防自動車を巻き込んで下へすべりました。そのとき消防自動車に乗っていた消防団1名の方が亡くなられたという事故が発生したわけでありまして。2次崩壊が起こった後しばらく三角の部分ですね、水はちょうどあそこに書いてある線の位置でありますから、堤防が若干残ったのですが、数分以内に三角の部分も水の浸透で崩れて破堤が発生したわけです(スライド5)。最終的には80mくらいの幅の堤防が流されて、安八町、墨俣町一帯を水浸しにしたという災害が51年の長良川災害でございます。



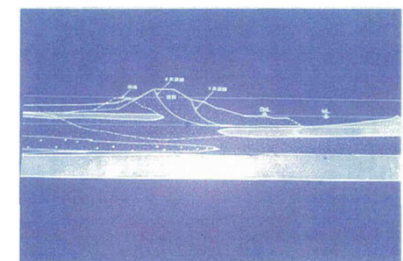
スライド 2



スライド 3



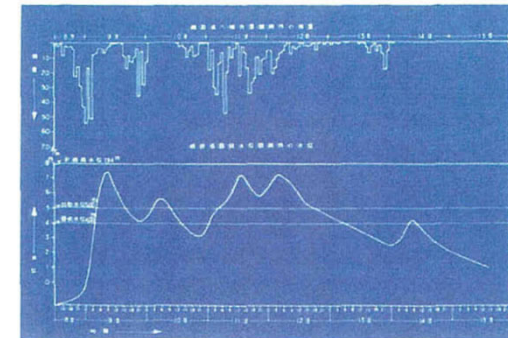
スライド 4



スライド 5

山村さん講演集より

- この時の雨量と水位の時間変化を表したのがこのグラフです(スライド6)。上が雨量でございまして、このときトータル1,000mmぐらいの雨が一遍に降ったといわれております。それから川の水位がハイウォーターにはいかないんですが、1回、2回、3回、4波繰り返しました。大変長時間に、これは警戒水位ですかね、計画高水位までいかないんですが、かなり長い時間高い水位を持続した。それで1、2、3、4切れたのが4番目のピーク当たりでありますから、もうちょっと頑張れば水害にならなかったんです。最後の最後ここで堤防が壊れてしまった。ほんのきわどいところで災害が発生したわけであります。大変長時間高い水位が持続した、こういう災害が起こったわけであります。
- ..これ(スライド7)は51年長良川災害が起こったときの他の場所の状況であります。何箇所かの堤防が破堤寸前の状態にまで変形したという報告がございまして、その時の写真でございまして。これも全線にわたってのり崩れが発生したしまして、斜面崩壊が各所で発生した。あるいは漏水が各所で発生したという報告がございまして。



スライド 6



スライド 7

山村さん講演集より

- 阿武隈川に配属になった時に私の堤防の調査がはじまったわけでありまして。堤防に計測器を設置して洪水のくるのを待っていたらたまたま運よく洪水が来て、斜面崩壊が発生した。主に小段から下でございますが、夜中に私が観測作業をやっていると、堤防がずぶずぶになった。それで天端と小段に亀裂が入った。ところが朝起きてずっと見渡しますと、自分のところだけでなく、ほとんど全線にわたって斜面崩壊が起こっておりました。
- (スライド8)・・・このように小段から下がすべった。・・・特に小段の亀裂が全線にわたって発生いたしました(スライド11)。・・・大雨が夜降って、朝になって水位が徐々に上がり始めました。・・・水位があがってくると斜面崩壊のすべりがもう少し進行した、そういう経過をたどりまして。



スライド 8



スライド 11

山村さん講演集より

- これは(スライド23, 24)昭和36年木曾三川(長良川)で起こった災害です. このときもかなり大きな雨が降りまして、木曾三川の堤防がかなりすべりました.
- 早速現地で調べて検討しろといわれて検討したのですが、やはり大雨が降ると堤防がすべる. これは阿武隈川で経験したのとまったく同じような状況が木曾三川で発生したわけでございます.
- これ(スライド35)は矢作川. これは私も40何年タッチした問題なんですが、ちょっと水が出ると漏水を起こすわけであります. これ(スライド36)は法尻の水路です. 手前が堤防でそこから見ておりますが水を吹くわけであります. このようにたくさん吹くんですが、吹くとガタガタに裏のりの石積みが壊れてしまいます(スライド37, 38).



スライド 23



スライド 24



スライド 36



スライド 35



スライド 37



スライド 38

山村さん講演集より

- これ(スライド41、42)は手前が堤防です。堤防の裏に砂を噴き出した1つの例であり、江の川の写真であります。このような砂が吹き上げる場合がある。長良川の下流部についても、かなり砂を吹き上げた跡が災害(安八災害)の直後に行ってみますとありました。このように砂をたくさん吹き上げたら地盤に空洞ができますから、これこそ堤防が劣化してくる原因であると考えられます。したがってこのような砂の吹き上げがある箇所は何らかの対策を打たないと洪水のたびごとに堤防が悪くなるというおそれがあると思います。
- これ(スライド43)は、長良川の(安八)災害が起こった近傍ですが、堤防の裏側から砂が大量に流れ出ている写真でありまして、裁判でもこういう現象を地元の人ほうるさく指摘しておりました。



スライド 41



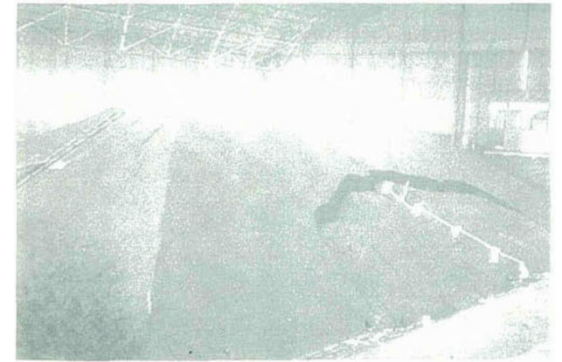
スライド 42



スライド 43

山村さん講演集より

- 盛土実験槽での降雨実験(スライド26). ..割合きれいな形ですべらせるにはいろいろテクニックがあるんですね. あまり締めてはだめ、できるだけ柔らかく締め、この中の浸潤線がある程度上がるとすべる. こういうことが何回かやっているうちにわかってまいりました. 大体70cmくらいあがるとすべるんですが..
- これ(スライド44)がずっとさかのぼりまして江戸川で実施しました堤防実験であります. ..非常に大きな堤防でありまして、従来4m程度が限度でありましたが、これは10m近い堤防であります. この堤防も非常に柔らかく作りまして、壊れるようにという設計をしましたので、雨を降らすだけで斜面崩壊が発生しました. ..このときはごくわずかな雨が降ったのですが、その前にかなり大きな雨が降っておりまして、実験のときはすぐすべったんです. その前の降雨がかなり効いているらしい. そういうことも含めて、現在いろいろ検討しておるんですが、すべるように斜面をつくれれば、ちょっとした雨でもすべらせることが可能です.
- 湛水実験も同時にやったわけでありまして. これは渇水期にやらなきゃなりませんので.. ..非常に長時間、約200時間かけますと堤防の浸透水が裏側に達して、小段にクラックが発生してクラックがだんだん広がってすべりが進行する. こういう現象がかなり大きな堤防であっても再現できる. ..このときは確か130時間非常に長い時間かかって浸潤線が裏側に到達したんです. ..実際の洪水の時には大雨が降る. 長良川の場合には1,000mm近い雨が降った. 地下水も河川水位があがるとかなり上がってしまう. そういうふうになると浸透水が進む速さは全く違います.



スライド 26



スライド 44



スライド 46



スライド 47

山村さん講演集より

- Q昔は締固めが弱かったんですが、雨によって締め固められた状態というのは、必要な締固めの程度にはならないんですか？
- A絶対にならないです。軟らかいですよ。明瞭に差があるんですよ。昭和30年代以前の堤防というのは軟らかいですよ。棒を刺していくと固さが全然違いますよ。締めてないんですから。トロッコで持って行ってひっくり返したただけですから。ですから、そういう堤防がたくさんある現状においてそれがどこにあるかわからないですよ。どこにそういう堤防があるかわからない。私はかなりあると思っています。私が建設省に入ったころは全く堤防を締めてませんでしたから。人夫は働くんですよ。1日に3m3くらいトロッコに積み込んで小回りというのをやっていたから。3m3なんか積むんですよ。それでひっくり返してこ盛り上げて、それで終わりですから。2、3年してから雨降って地固まると。固まったから成形して土羽うち、表面だけね。女の人夫が叩くだけですから。ただ、水を抜ければかなり安全ということであれば、堤体の中はわからなくても、最低限基盤の法尻にドレーンを入れるとか。そういうことをやる設計論はどうですか。
- Qそれである程度信頼度を持った設計論にならないですか。
- Aいやなと思いますよ。ある程度プラスになるでしょうね。
- Q先生がおっしゃったように、中身がよくわからないというのは確かなんでしょうけど、平均的に上げるというのが回答になるのか分からないのですが、平均的に上げるというところからやるかというような話になったときに、どこか過去に現象が起こっていたというような箇所は最優先だと思うんですがね。そのほかはどういうお考えですか？
- Aそれとか一番客観的には水位差が大きいところとか、堤防の断面がやせてるところとか、いろいろあるでしょう。客観的に。
- Q計算というのはそういうのと同レベル、あるいはそれをフォローするようなものとして使えるんですかね。
- A計算やってもね、最初に答えがあるんじゃないかと思うんですよ。そんなにうまくいかないですよ。すべり計算というのは、円弧滑りの計算なんていうのは。
- Qえいやと思いきりではあるんですけど、そういうものがないとどの規模の応急対策をやったりいのかというのは、一応の割り切りでもいいから決まらないんですね、感覚だけの世界だと。何かの割り切りというかやり方がないと。補強をやるにしても何かのやりかたがいる。

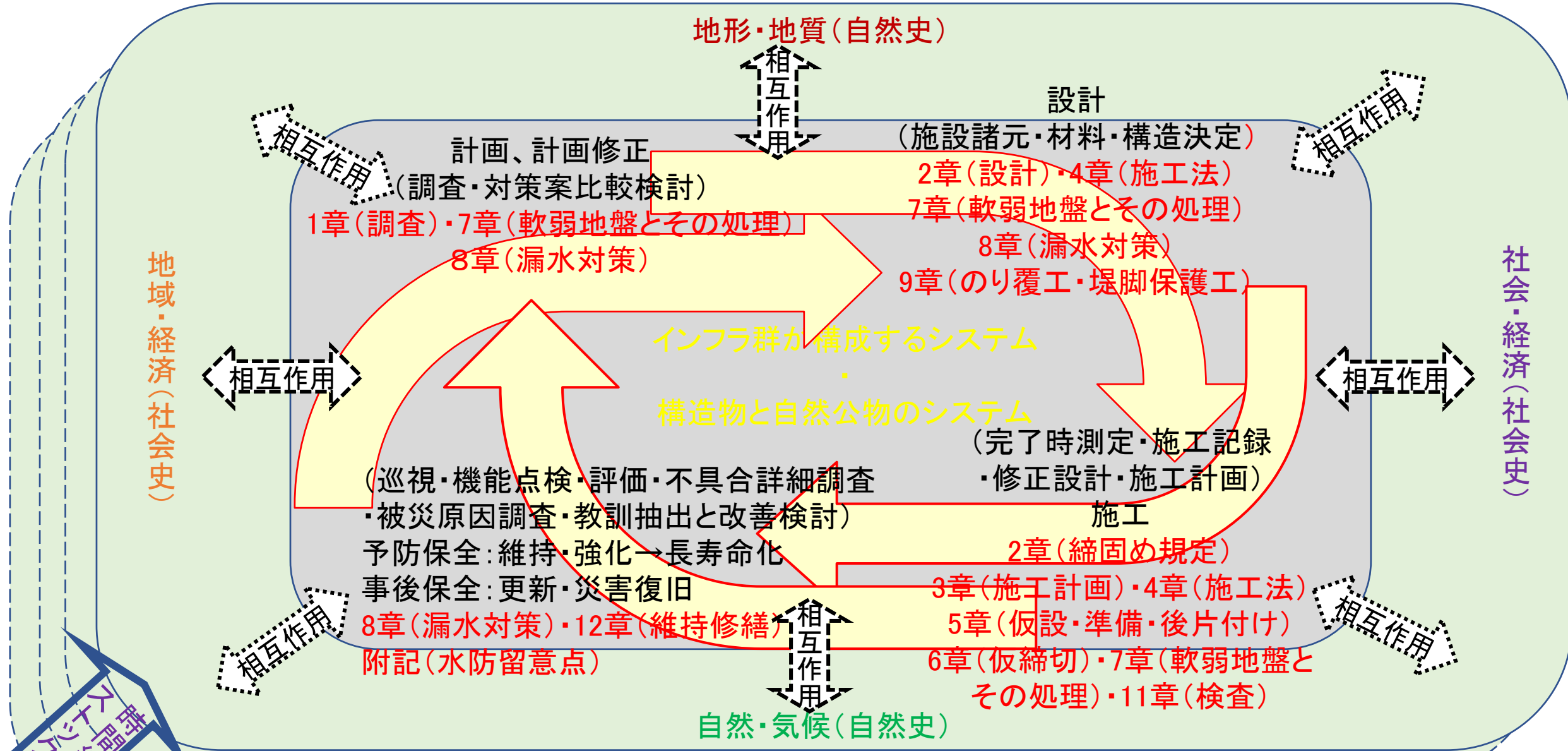
山村さん講演集より

- Qただ浸透流解析を河川の場合はかけるんで、そこが道路と一番違うところなんですけれども、道路の場合は円弧滑りだけですから。
- Aだから浸透流解析も本当にいいことをやっているかどうか私も良くわかりませんよ。現状でやっているやつが。
- Qやっぱり動態観測なんかも併用しながらチェックして行って、将来精度をあげていくということをやらないと、何か武器は、設計手法はいるということだと思うんですよね。ないもないともう経験だけということになる。
- Qいつも悩んでいるのは、堤防の技術論というのが長良川のとときの井上陳述書的な経験論という捉え方だけで行ってしまうと、どうも先へ行く道がなかなか見えてこないところがある。じゃあ何をすればいいんだと。ある程度ストレートに堤防設計につながるかどうかは別にして、堤防の安全性というものをどのように評価していけばいいのかとか、そういうことを勉強することによってある意味では技術の方向というものが少しずつ見えてくるような努力をせにやいかんのかなと思うわけです。
- Aいやそれはいいんですよ。それは私も認めるんですが、道路だって鉄道だって標準断面があるわけですね。河川堤防は標準断面ではいけないんですか？
- Qそれは大原則です。それは大原則で、その標準断面の中でも安全度の高いところ、ひくいところまちまちばらつきますね。弱いところは相対的に強化していこうという方向なんです。
- Aだから一応、一応これなら安全で、普通だったら安全ですよという標準断面があつてね、弱いところはプラスするという考え方ならいいんですよ。
- Q堤防の内部構造というのなかなかわからないところなんで、悩ましいところではあるんですけど。洪水を守る最後の線は堤防で、地域のいろんな方々が全部自然物だと思ってもらえるかという、なかなかそうはいかない。その狭間をどう埋めていけばいいのかというところで悩んでいる状況かなと思っていますがね。
- Q長良川河口堰のときも、多少水位が上がるということに対して、詳細な浸透流解析と補強対策を決めて、それをオープンにしてようやく納得してもらったという、それしか説得のやり方がなかったというのはありますから、やはり説得の材料としては、合っているか合っていないかは別にして何かいるんだろうという。
- Aただ、円弧滑りの計算でうまくいくのかどうか私は自信ないですね。一応、標準断面というのはまず最初に安全であるというのを考えているでしょう。それでどうも不安だという場所のみについて検討するという方向なんですよ。

山村さん講演集より

- Q堤防の定規断面だけで安全にしようといっていないですよ。水制とか護岸、根固めその他相まって安全にすると、ここをどうやったら安全なのかという物差しがない。それは設計論なのか評価論なのかわかりませんが、何らかの形で数値であらわしていかないとどうも説得力がなくなっちゃうんじゃないか。
- A相対評価で弱い場所をみつけて、その場所について説明が必要であれば、いろんな計算なりあるいは解析なりをするということじゃないですかね。相対論、相対的にですよ。相対的に弱いところを見つけるのは、いろんな情報を全部重ね合わせて、個々がどうも一番弱そうだというのを客観的なデータから決めていく。
- Qそれで抽出されたところについて補足的なことをやってそれで計算をやっていくと。
- Aそういう場所についてはね、ある程度、こういう面が不安であるというなら、それについて検討するという形がいいのかなあと。例えば漏水が心配であれば、漏水に対する検討をする。それはすべりというのがあるかどうかは私はわかりませんがね。
- Q先生がおっしゃったのはある意味では堤防って意外と丈夫だということですか？
- Aいや、意外と丈夫なんですよ。何か特別なやつがあるとガサッといくな。だからなかなか計算に乗らないんじゃないかと思うんですよ。例えば、変なものがあったとかね。地盤が特別に悪かったとかね。なにかやっぱりあるんでしょうね。普通だったら容易に壊れないと思いますがね。
- Q54、5年頃、ガマとかずいぶん調べた記憶がありますが、今どうなっているかといわれるとちょっとあれですけど。
- Qちょっと質問なんですけど、先程のスライドの中でも、堤防の法尻付近でブワッと出てるやつと、大分遠いところ出てるやつがありますね、膨らんでるところ。ああいうのは重要なのは近場のところなんですか？
- A近場の方でしょうね。遠いところが盛り上がってるのは表層がスカスカですね。調査をする人が現状を認識していないんじゃないかと思うんですよ。どういふものであるかということ、全く見たことも考えたこともない人が調査をやるんじゃないかというものはできそうにないですね。

1976土工指針(案)



国土院
国土審議院

「計画」・「設計」はマネジメントの局面の1つ。「計画」や「設計」に偏重すべきでない

河川土工指針(案)

社団法人・日本河川協会 1976.3 非売品

- この時代、河川砂防技術基準として施工編、維持管理編は発刊されなかった。しかし、現実に堤防を管理し、また堤防を築堤するには、具体的施工法、構造形式、品質管理が行われねばならず何らかの基準が必要であった。当時、堤防築堤は請負でなされており、具体的施工機械の開発、施工の合理化の主体は民間に移っていたが、発注者、積算者、施工管理者、検査官として官庁技術者は好適責任を負っており、これらについての知見が必要であった。
- 昭和51(1976)年3月、「河川土工指針(案)」が社団法人日本河川協会から発刊(非売品)されている。これは本省治水課関与のもと、堤防土質の研究を行っていた建設省土木研究所の研究者である山村和也、久楽勝行、各地方建設局の工事課長を中心に協議、討論され編集されたものを、社団法人日本河川協会名で印刷されたものである。
- 直営工事が終了し、現場で施工、監督業務のなかで培われた技術が伝えられなくなっていたこと、昭和31(1956)年「道路土工指針」が発刊され42年、49年と改訂されていたこと、堤防工事発注において工法の選択・積算根拠が必要とされたことなどが、この指針化を促したといえよう。民業機械化施工という当時の状況に応え、土木研究所での堤防の研究成果、直営機械化施工時代の技術経験を盛り込んだものとなっている。
- なお、「河川砂防技術基準(案)計画編」が6月発刊、「河川管理施設等構造令」が7月に制定、10月に施行されている。本書の印刷の方が少し前であった。
- 指針(案)は全12章からなる。第1章:調査、第2章:設計、第3章:施工計画、第4章:施工法、第5章:仮設及び準備後片付け、第6章:仮締切、第7章:軟弱地盤とその処理、第8章:漏水対策、第9章:法覆工及び堤脚保護工、第10章:・・、第11章:検査、第12章:維持修繕 である。河川土工を主題とするものであり、堤防の調査・設計・維持管理を含むものであった。

河川土工指針(案) 第2章:設計

社団法人・日本河川協会 1976.3 非売品

- 第2章は、「掘削及び浚渫」「堤防」の2節からなる。堤防のみ概説する。
- 1) 堤防の安定
- 堤防の安定性については、
- ①浸透水に対する安定
- 堤体土として砂質土を用いる場合、所定の断面より小さい断面の堤防、堤体前面の掘削が行われる場合、透水性地盤上の堤防では、流線網を描いて浸透水に対する堤体の安定性を検討するものとする。法尻付近に高い浸透圧が生じて堤防の土を流出させ安定の低下を評価するものであるが、このほかに浸透流による堤防強度の低下による法すべりに対する安定性の低下について、別途検討が考えられる(②の検討)
- 浸透流に対する検討は8章で記述された方法、流線網は定常浸透流として求めるものとされた。
- ②すべりに対する安定
- 軟弱地盤上の堤防、特殊堤防、堤体材料として特に強度の低い土を用いる場合、堤防の法尻付近の掘削を行う場合では、堤防のすべりに対する安定性計算を実施するものとする。安定計算は、計画高水位に対する定常浸透状態、計画高水位より平水位に急低下した場合、降雨によるのりすべり面に対して円弧すべり法により行うものとする。
- 安定計算の式は7章で記載されたものとし、これに用いる土の強度定数は、堤体材料を堤防施工時の条件(含水比及び密度)で締固めて飽和させた圧密非排水三軸圧縮試験によって求めるとし、また安定計算における間隙水圧は定常浸透流に対しては8章に記述された方法、水位低下の場合は、土質工学会「土質工学ハンドブック」p.928に記述されているレイニウス(Reinius)の方法あるいはキャサグランデ(Casagrande)の方法による流線網を求めるとした。
- 降雨による安定性の必要性が記述されたこと、土質工学的安定性の評価法が提示されたことが特筆に値する。

河川土工指針(案) 第2章:設計

社団法人・日本河川協会 1976.3 非売品

- 2)堤防の土質
- 堤体材料としての基本条件を満足する土として、以下のようなものが望ましい。
- 粒度分布の良い土:締固めが十分に行われるためにいろいろの粒径が含まれているのがよい。粗粒分は粒子の噛み合わせにより強度を発揮し、細粒分は透水係数を小さくするのに必要である。これらが適当に配合されていることが堤体材料として好都合である。
- 最大寸法は20~30cm:施工時の撒き厚の制限から決まるものであるが、撒き厚が30cm以上で礫の間の充填が十分に行われるものならば、もっと大きい粒径の用いてもよい。
- 細粒分(0.074mm以下の粒子)が堤体材料(75mm以下)の15%以上:不透水性を確保するための条件である。
- シルト分のあまり多くない土(シルト分の少ない土と判断する):降雨による侵食、浸透流によるのり面崩壊は水のある程度通しやすく、含水比の増加によりせん断抵抗の低下する土に起こった例が多い(シルト分に関する量的記述がされていないので文意が明確でないが、シルト分が少ない砂分の多い土のことではないかと推定する)が、そのような状態になるのはシルト分の影響が大きいと考えられる。
- 細粒分(0.074mm以下)のあまり多くない土:細粒分が50%以上のものには乾燥時にクラックの入る危険性があることがアースダム材料について指摘されている。
- 堤体材料として適切でない土については、堤防は道路や他の盛土ほど材料の選択基準を厳密にしないでほとんど土を利用するので、上記の望ましいとされた条件に合致しないものが不適切ということにならず、予想される事態(強度不足、漏水、軟弱化など)に対応する方策を講じて設計する。ただし、有機質土は問題が多く捨土を考えるべきである。
- 不良材料に対する対策として、他の土と混合、乾燥による含水比の低下、添加材による土質改良、複合断面化を挙げている。

河川土工指針(案) 第2章:設計

社団法人・日本河川協会 1976.3 非売品

- 2)堤防の締固め規定
- 堤防の締固め規定は次のいずれかによる.
- 最大乾燥密度(JIS A1210による) 80%以上.
- 飽和度 85~95%.
- 空気間隙率 10~2%
- 通常の土に対しては最大乾燥密度の規定によるが, 高含水比の土ではこの規定では締固めできないので, 飽和度, 空気間隙率の規定による. 既存の堤防の締固め度の平均値では83%程度と言われており、道路盛土と比べてやや低いが, 堤体材料として厳密に規定していないこともあって, 幾分低めの基準値としている. 目標値としてもう少し高い締固めを想定して設計施工を行うことが望ましい.
- あらかじめ試験転圧を実施した場合や既に施工した現場での実績から判断して, 上記締固め規定に合致する結果の得られている場合は, 転圧機械の種類や転圧回数を規定して締固め度規定としてよい.

河川土工指針(案) 第3章: 施工計画

社団法人・日本河川協会 1976.3 非売品

- 第3章は、「概説」「締固め」「土量変化」「配土計画」「工程管理」「建設機械の選定」「作業能率の算定」の8節からなる。締固め規定以外は省略する。
- 1) 締固め
- 設計の締固めに関する記述より詳しく記述されており、内容が異なる記述がある。以下に違いのある内容を記す。
- 密度比較で規定する方法。
- 設計の締固め規定の最大乾燥密度に対する現場における締固め後の乾燥密度の比が、「道路工事では一般に締固め度90%とすることが多いが河川堤防の場合は85%以上と規定することが多い」との記述がある(設計の最大乾燥密度の80%以上と数値が異なる)。
- 飽和度または空気間隙率による方法
- 設計の締固め規定と同様である
- 強度特性によって規定する方法
- 設計の締固め規定では、難点があり適当でないとしたが、施工計画では、「安定した材料、すなわち水の浸水により膨張、強度低下の少ない材料の場合(岩塊、玉石、砂、砂質土)は強度特性で規定できる。」としている。「強度特性として何を測定するかについては一般的基準についてはまだ決まったものがないが、CBR値、K値、コーン指数などが用いられている」としている。
- 締固め機種、締固め回数により規定する方法
- 設計の締固め規定と同様である。
- 簡単な施工法によって規定する方法
- 「敷き均し時の土工機械の走行による締固めを期待して、まきだし厚を適当に定め、水平に敷き均して施工することのみを規定しておく方法も考えられる」としている。

河川土工指針(案) 第4章:施工法

社団法人・日本河川協会 1976.3 非売品

- 第4章は、「概説」「掘削と運搬」「築堤」「護岸工事における土工」「構造物施工における土工」「浚渫」からなる。ここでは築堤土工に関わる技術内容についてのみ記す。
- 1) 築堤
- ①概説 堤防の盛土は、一般的に河道を掘削した土を利用することが多い。河道掘削土を利用する場合には必ずしも築堤土に最適な土質、含水状態のものが得られない場合も多いので、掘削、運搬、盛土の工程の中で調整し、極力最適な状態で盛土する。耐透水性に重点が置かれるので堤体内には空洞性の空隙を作らないよう密な盛土とする。一連の堤防のうち、一部分に欠陥があり、それにより破堤すれば、長い一連な築堤は効果を失うので、必要以上に締固められた堤防があっても意味がないので、延長的にも、また断面的にも均一な強度と密度で施工されることが重要である。
- ②堤防材料の管理 ・高含水土の処理 土取場において流水とか降雨によって含水率が高くなった場合は正常な含水状態に戻るまで作業を中止すべきである。土取場における土の含水率が高いが脱水しやすい土の場合は、いったん築堤場所に近い場所に仮置きする方法も行われる。 ・不良土の棄却 腐植土とか高粘土質は、通常の工法では使用しない方がよい。 ・シートなどによる被覆 築堤個所に盛土され、敷き均された状態のまま降雨や降雪を受けると、締固め不適な状態となって工程の支障となるので、表層をシートまたはビニール等で被覆する。
- ③基礎地盤 施工途中においてすべりを生じるような脆弱な地盤は前もって良質の土砂に置き換えるとか、排水溝を設けて地下水位を低下させ圧密させ強固な地盤に改良する。基礎地盤面にある雑草、雑草根、雑石、コンクリート塊等は入念に除却して盛土と基礎地盤の接着を十分に図る。
- ④築立 堤防は洪水時に漏水等を起こさないことが大切である。したがって、下層から上層に至るまで均一に締固めることが必要である。高撒きして表層部分だけ締固めるようなことは絶対にしてはならない。盛土は薄い層毎に敷き均して転圧して築き立てしなければならないが、一方において必要以上に締固めると盛土量の増大を招くことになるので、配土上の留意が必要である。

河川土工指針(案) 第4章:施工法

社団法人・日本河川協会 1976.3 非売品

- ・ブルドーザーによる締固め 運搬した土は薄い層に敷き均して転圧して締固める。敷均しの厚さ及び締固め方法は、施工法、土質及び要求される締固め度によって異なる。ブルドーザー、スクレーパ等で運搬盛土する場合は、捨土そのものが敷均しであるが、全面を均一に締固めるには改めて一定の厚さ毎に転圧する必要がある。転圧の方向は堤防法線に平行であることが好ましいが、平面積の大きい堤防では法線に直角に転圧することもある。転圧には敷均しも兼ねてブルドーザーが多く使用される。この場合には、敷均し中の効果も含めて転圧回数を規定している場合もあるが、施工にあたっては敷均し完了後の転圧回数で管理すると良い。軽量で接地圧が小さいブルドーザーの場合には、敷き均し厚を薄くして転圧する必要がある。
- ④築立 堤防は洪水時に漏水等を起こさないことが大切である。したがって、下層から上層に至るまで均一に締固めることが必要である。高撒きして表層部分だけ締固めるようなことは絶対にしてはならない。盛土は薄い層毎に敷き均して転圧して築き立てしなければならないが、一方において必要以上に締固めると盛土量の増大を招くことになるので、配土上の留意が必要である。
- ・ブルドーザーによる締固め 運搬した土は薄い層に敷き均して転圧して締固める。敷均しの厚さ及び締固め方法は、施工法、土質及び要求される締固め度によって異なる。ブルドーザー、スクレーパ等で運搬盛土する場合は、捨土そのものが敷均しであるが、全面を均一に締固めるには改めて一定の厚さ毎に転圧する必要がある。転圧の方向は堤防法線に平行であることが好ましいが、平面積の大きい堤防では法線に直角に転圧することもある。転圧には敷均しも兼ねてブルドーザーが多く使用される。この場合には、敷均し中の効果も含めて転圧回数を規定している場合もあるが、施工にあたっては敷均し完了後の転圧回数で管理すると良い。軽量で接地圧が小さいブルドーザーの場合には、敷き均し厚を薄くして転圧する必要がある。
- ・タイヤローラーによる締固め 土質が砂質等であり転圧速度の大きいロードローラ、タイヤローラの機械の使用条件が整っている場合は、使用して効率的であるが、粒子が揃っている砂等ではローラがスリップして能率を落とすことがある。
- ・現場の締固め試験 一般的に締固め度は数値で規定しているが、小規模な工事や土質の良好な場合は、転圧機種、敷均し厚さ、転圧回数を定めて締め固めを行っている例が多い。締固め度が規定された場合は、各現場であらかじめ現場締固め試験を行い、機種別の締固め方式を定めることが好ましい。なお、現場締固め試験の際にコーンペネトロメータの測定を併用し、測定数値を施工管理に活用するとよい。

河川土工指針(案) 第4章:施工法

社団法人・日本河川協会 1976.3 非売品

- ・浚渫土を利用した場合 浚渫土が比較的良好な砂の場合であり、築堤幅が広い(30m以上)場合にはポンプ浚渫船によって直接排泥することがある。この場合、排泥河床において細粒土が分離して1か所に集中堆積することを避けるため、図9.14のように小築堤による周囲堤を築き立てして湛水池をつくり、池の排出口には木製の堰を設けて排水する。周囲堤は排泥の進行に従って逐次盛土(土質によっては板柵工とする)していく。この場合の排泥は排泥管の先端のみならず中間数か所から分枝して同時排泥することによって、粒子の分離を避けると良い。十分脱水するのを待って仕上げを行い、被覆土を施工する。浚渫箇所と築堤箇所が遠い場合、築堤幅が狭い、浚渫土に細粒土が多い場合には、適切な位置に仮置き土箇所を設けて排土する。仮置き場からの運搬は通常の機械掘削による場合と再びポンプ船で浚渫排泥する場合がある。仮置き場ではできるだけ高く盛土することが脱水効果を速くすることになるが、反面土砂の分離が起こって盛土として不適格となる場合がある。しかし、不良粒土を分離棄却したい場合は有効である。
- ・施工中の沈下 盛土に伴い基礎地盤は圧縮し、また圧密によって沈下する。底面積の広い場合には沈下量が所要土量に大きく影響するので、必要土量の管理のため、あらかじめ基礎地盤内に沈下板を設けて沈下量の測定をする必要がある(以下、沈下量の測定の記述があるが省略)
- ・混合物の排除 盛土として不適切な不良土、雑木根、雑石等は土取場でも排除するが、盛土箇所においても監視させてその都度処理する必要がある。また、凍土、氷雪塊は春になって陥没を起こした例が少ないので、これらの除却については入念に管理する。
- ⑤のり面施工 盛土の各層の端部(のり面となる部分)の締固めは、十分に行われないので、盛土が一応完成した後、図9.15のように盛土端部の幅50~100cmの部分の土をいったん取り除き、厚さ30cm程度の層毎に人力又は振動コンパクタ、小型振動ローラによって締固めながら盛土して仕上げる。のり面勾配が1:2より緩い場合は、ブルドーザ等によってのり面を往復させながら直接締固めることができる。堤防のり面は芝張を施すので、新面丁張に従い、人力によって木製の板あるいは棒でたたいて安定させながら仕上げる。このことを「土羽うち」という。
- ⑥段切り 旧堤防に腹付け工を施工する場合は、旧堤との接着を図るため、図9.16のように最小50cm程度とした階段状に段切りする。水平部分は2~5%の勾配をつける。
- 2) 構造物施工に伴う土工
- 構造物は杭打ち基礎等によって堅固な基礎状態となるが、構造物に接する埋戻し土は十分締め固まっても、その後において圧縮、圧密が進行するため、構造物と埋戻し土との沈下量の差によって構造物に沿って亀裂が発生することがあるので、プレローディング工法等によってこれらの弊害を防ぐことを考慮すると良い。

河川土工指針(案) 第7章:軟弱地盤とその処理

社団法人・日本河川協会 1976.3 非売品

- 第7章は、「概説」「軟弱地盤の調査法」「軟弱地盤における堤防の設計法」「軟弱地盤における対策工」「施工管理法」の5節からなる。
- 概説において軟弱地盤の問題点として以下の3点を挙げている。
 - 基礎地盤の支持力不足によるすべり破壊
 - 基礎地盤の圧縮性が大きいために生じる過大な沈下
 - 特に緩い地下水位の高い砂質地盤において地震時に生じる流動化
- 3点目はいわゆる液状化による堤防の沈下、側方移動が生じるもので、大正12年の関東大震災でも生じていたが、堤防の問題点として対策検討は昭和39(1964)年の新潟地震による地盤災害を契機として検討が進んだ。軟弱地盤とは一概に言えない地盤であり外力も地震で別の範疇に入る問題であった。
- 以下では堤防の設計法と対策工法に関してのみ概説する。
- 1) 軟弱地盤における堤防の設計法
 - ① 設計の進め方 堤防の高さ、天端幅、小段段数、法勾配はその河川の水理機能、洪水時の溢流・浸潤に対する安定性から定まるので(河川管理施設等構造令、河川砂防技術基準計画編による規定された堤防断面であるべきであるが、これらは本河川土工指針案の後に制定された)、ここでの設計は、そのような所定の断面の堤防が構造物として安定であるかどうかをチェックし、何らかの対策が必要であるかどうか、さらにどのような対策工法をとるか決定することである。設計の流れは図9.17のようになる。

河川土工指針(案) 第7章:軟弱地盤とその処理

社団法人・日本河川協会 1976.3 非売品

- ②堤防の安定計算法
- 土堤の安定計算は、円弧すべり面法により、いくつかの円弧について最小安全率を求める。図9.18に示すようにすべり円の中心及び半径を設定し、この円弧内に含まれる土塊を適当な幅の鉛直細片に分割し、次式で安全率 F_s を計算する。
- $$F_s = \sum \{c_i l_i + (W_i \cdot \cos \theta_i - u_i \cdot l_i) \tan \varphi_i\} / (W_i \cdot \sin \theta_i)$$
- ここに W_i : 分割片の全重量, u_i : すべり面上の間隙水圧, c_i : すべり面上の粘着力, φ_i : すべり面上の内部摩擦角, l_i : 円弧の長さ, θ_i : 円弧中央における法線と鉛直線のなす角。円弧すべり面計算における強度定数は土質により以下のとおりである。
- ・粘性土・有機質土の場合 緩速施工または何らかの地盤処理を行う場合を除いて、非圧密非排水強度 c_u を用いる。
- $c = c_u = q_u/2$ $\varphi = \varphi_u = 0$ ここに、 q_u : 飽和土の一軸圧縮強さ
- 緩速施工や地盤処理により施工中の圧密による強度増加が期待できる場合あるいは築造後長期間経過した場合には、想定圧密度に対応する圧密非排水強度 c_{cu} を用いる
- $c = c_{cu} = c_0 + \Delta P \cdot m_i \cdot U$ $\varphi = 0$ ここに、 c_0 : 現地盤(非圧密非排水)強度(= $q_u/2$), ΔP : 堤体過重による地盤内鉛直増加力, この値の推定にはオスターベルク(Osterberg)の図表が用いられる。 U : (すべり面の土の)圧密度, m_i : 強度増加率。なお、式(9.1)以下の式は平成5年発刊の「河川土工マニュアル」のpp.90-94と式形が異なる。訂正が必要と判断される。
- ・砂質土の場合 排水強度 c_d を用いる。堤体について $c = c_d$ $\varphi = \varphi_d$ 地盤について $c = c_d = 0$ $\varphi = \varphi_d$

河川土工指針(案) 第7章:軟弱地盤とその処理

社団法人・日本河川協会 1976.3 非売品

- ・地震時の安定計算
- ・地震時の安定性を検討すべき方法は未だ確立されているとは言えないが、必要な場合は円弧すべり面法に静的震度法を適用(紙幣震度を外力に加える)し安全率を算定する、強度定数は常時と同じとする。地震について特に検討が必要であるのは、洪水時に自信により堤防の沈下が生じた場合や、堤内地が常時海面下にあるような低地の場合であるから、この場合の水位条件は計画高水位とし、間隙水圧はこの条件から定まる定常浸透状態について求めた値とする。液状化の生じる可能性のある緩い地盤では、地震時に何らかの過剰間隙水圧が発生するものとして、上記と同じ方法により安全率を算定する(具体的な過剰間隙水圧の算定法について記述がない。参考文献に「日本道路協会 耐震設計指針・同解説(昭和47年)」とあるので参照せよということであろう)。
- ③堤防の沈下計算 圧密沈下量の計算法が開設されている。省略する。
- ④軟弱地盤における対策工法 河川堤防を築堤する際に用いられる軟弱地盤の対策工法として次の工法が挙げられている。
 - ・築堤方式で改良するもの A:緩速施工法, B:押さえ盛土工法, C:サンドマット工法
 - ・軟弱層を除去置換するもの D:掘削置換工法
 - ・軟弱層を改良するもの E:プレローディング工法, F:バーチカルドレーン工法, G:サンドコンパクション工法, H:バイブロフロテーション工法, I:生石灰杭工法 これらの対策工法の選定のための標準条件を表9.5に示す。以下工法の説明がなされている。省略する。

表9.5 対策工法選定のための標準条件

対策工目的	軟弱地盤成層状態	適用工法
主として堤体の安定性のみが問題となる場合	軟弱層が浅い部分にあり、薄くて排水距離が短いため、盛土中の強度増加が十分期待できる場合	A,C (工期に余裕がある場合)
	軟弱層が深い部分まで存在し、厚くて排水距離が長いため、築堤中の強度増加がほとんど期待できない場合	B,D,F,G (工期に余裕がない場合)
剛性法覆工や構造物周辺のように主として施工後の残留不等沈下が問題となる場合	軟弱層が浅く薄い場合	D,E I (構造物周辺のように局所的な改良を行う場合)
	軟弱層が深く厚い場合	E,F,G I (構造物周辺のように局所的な改良を行う場合)
緩い砂質地盤で地震時の液状化が問題となる場合		G,H

河川土工指針(案) 第8章:漏水対策

社団法人・日本河川協会 1976.3 非売品

- 第8章は、「漏水対策の概要」「新設堤防の漏水対策工」「既設堤防の漏水対策工」「堤防地盤の漏水対策工」の4節からなる。
- 1)漏水対策の概要
- 堤体漏水を起こす原因として
 - 堤体断面が小さすぎる場合 ・堤体に水みちができている場合 ・堤体が粗粒物を多量に含む未風化の山土または砂礫で作られ、表法または中心部に止水壁のない場合 ・堤体の締固めが不十分な場合 ・地震等堤体にクラックの入った場合 を挙げている。
- 地盤漏水が起こる原因として
 - 透水性の大きい砂層または礫層上に築堤した場合 ・旧河川を締切、河床砂礫上に築堤した場合 ・破堤河床を締切った場合 ・堤防法先の高水敷の表土が流水により洗堀され、透水層が現れた場所 ・堤防表法尻付近で土取を行い、透水層を露出させたり、不透水性の表土の厚さを薄くした場合 ・地盤沈下により河川水位と堤体地盤との差が大きくなった場合 を挙げている。
- 定性的記述であるが、漏水の原因がほぼ網羅されている。堤体を横過する横断構造物周辺の漏水についての記述がない。
- 漏水対策は次の手順で行うとしている。
 1. 漏水箇所の詳細調査を行い、その調査結果に基づき漏水箇所の土質断面、外水位、内水位などを決定する。
 2. 1の諸条件のもとで堤体並びに地盤の流線網、浸透圧、漏水量、パイピングおよび堤体の安定性などについて検討する。
 3. 2の検討結果に基づき新設堤防、既設堤防および堤防地盤に応じた漏水対策工を決定する。
 4. 施工後、漏水対策工の効果判定のために現地調査を実施する。

河川土工指針(案) 第8章:漏水対策

社団法人・日本河川協会 1976.3 非売品

- ①漏水調査 漏水対策のため第二次本調査に従い、次に示す精密調査を実施する。
 1. 既往の洪水記録, 被害状況ならびに築堤土質に関する資料調査及び聞き込み調査
 2. 試料採取および室内土質試験
 3. 原位置試験(現場透水試験および現場地下水位変動調査など)
- ②漏水箇所土質断面の作成 1/100の縮尺の土質縦断面図ならびに横断面図を作成する土質断面図の作成にあたっては、ボーリング試験, サウンディング試験, 土質試験それぞれの試験結果をまとめ、深さ方向に整理する。図9.19に土質断面図の一例を示す。
- ③水位の決定 漏水対策を検討する上での外水位と堤体水位を決定する。 1. 外水位は計画高水位とする。 2. 内水位は現地地下水位変動調査の結果に基づき堤内地の年間の平均水位とする。
- ④洪水継続時間の決定 洪水継続時間は長いとして、定常流を考慮に入れて透水対策を検討することを原則とする。安全側過ぎると判断される場合は不定流として取り扱うものとする(判断基準は不記載)。
- ⑤堤体の流線網の求め方 浸透水の流線網は必要に応じ次に示す方法により求める。 1. キャサグランデの半理論公式を用いて流線網を求める方法 2. 図解法により流線網を求める方法 3. 電気模型による実験から流線網を求める方法 4. 粘性流体模型から流線網を求める方法 5. 有限要素法を用いた浸透解析から流線網を求める方法 6. 大型模型実験から流線網を用いる方法 流線網を求める方法は(上記のように)種々の方法があるが、堤防が均一な場合は1及び2を利用して流線網を求めることが可能である。1～5の方法は、飽和浸透の基礎式がラプラスの方程式であることを前提とした方法である(不飽和浸透解析ではない)。
- ⑥漏水地盤内の浸透圧の求め方 次に示すような方法により求めるものとする。 1. 理論解より浸透圧を求める方法 2. 電気模型による実験から浸透圧を求める方法 3. 有限要素法を用いた浸透解析から浸透圧を求める方法 堤防及び地盤条件が簡単な場合は、解析的方法により求めた理論解の事例が紹介されている。

河川土工指針(案) 第8章:漏水対策

社団法人・日本河川協会 1976.3 非売品

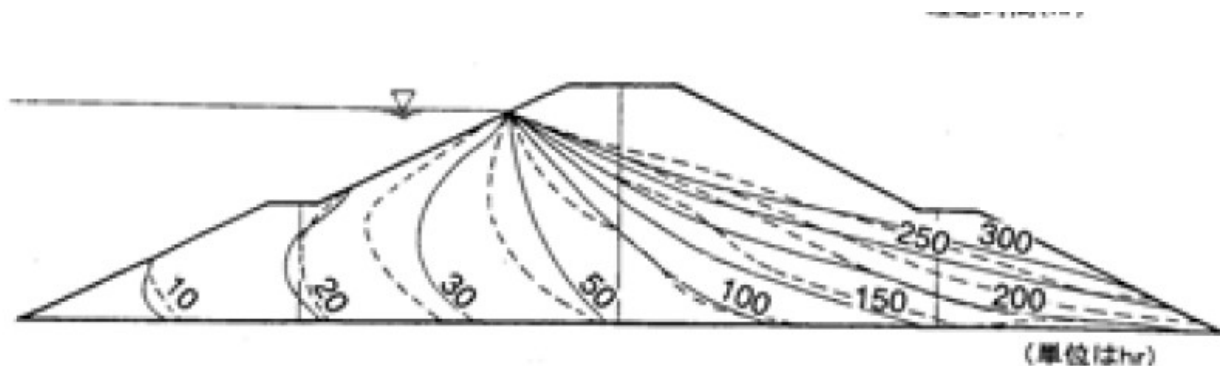
- ⑦漏水量の求め方 流線網及び浸透圧が求められれば各地点の漏水量 Q は、 $Q=k \cdot i \cdot A$ で求められる。 k は透水係数、 i は動水勾配、 A は透水断面積である。
- ⑧堤体の安定性の検討 堤体の安定性は、式9.1の安定計算によって検討し、安全率は1.25以上とする。
- ⑨クイックサンドに対する検討 地盤漏水において、浸透水が堤防裏法尻の表層を突き破って土砂を洗い流し、砂が噴き出すことがある。これをクイックサンドという。このような現象が生じる動水勾配を限界動水勾配 i_c といい、これを求めて堤内地法尻付近の砂の噴き出し現象に対する検討を行う。
- $i_c = h/z = (G_s - 1)/(1 + e)$ 9.6 ここで、 h :水頭差、 z :浸透経路長、 G_s :砂の比重、 e :間隙比 限界動水勾配は大体1に等しいが、漏水対策としてはこの値が0.5程度を超えないよう処置することを原則とする。 なお、コンクリートダム等ではクイックサンドの危険性をクリープ比というものをを用いているが、これはコンクリート等の不透水性構造物に沿う浸透に対して検討したものであるため、堤防の場合にはクリープ比を用いた検討は行わないものとする。
- ⑩漏水対策工の選定 流線網、浸透圧、漏水量、堤防の安定性、クイックサンド等に対する検討結果から次に示すような現象が起こる危険性が認められた場合には、これらの危険性を除くことを目的に漏水対策工を施すものとする。 1. 漏水により堤体の安全性が損なわれる危険性がある場合 2. 地盤漏水により堤内側法尻付近に砂の噴き出しが起こる危険性がある場合 3. 2の噴き出し現象に至らないまでも、過度の地盤漏水により付近住民に甚だしい不安感を与える恐れのある場合 漏水対策工は後記する2)新設堤防、3)既設堤防、4)堤防地盤、に対する漏水対策工の中から、堤防及び地盤条件に応じ選定する。
- ⑪漏水対策工の決定 選定した漏水対策工(2~3種)について、次の項目について検討を加え、最も好ましい漏水対策工を決定する。 1. 漏水対策工の止水効果 2. 漏水対策工の施工性とその確実性 3. 漏水対策工の経済性
- ⑫漏水対策工の効果判定のための現地調査 漏水対策工を施工した後に、その効果確かめるために現地調査を行うことが好ましい。 1. 実験的に求める方法・締切り堤を築造し、湛水させて浸透実験を行い、止水効果を判定する方法・ウェルポイントなどにより揚水試験を行い、止水効果を判定する方法 2. 洪水時の観測による方法・観測穴に水位計を設置し、洪水時の水位測定を行い、止水効果を判定する方法

河川土工指針(案) 第8章:漏水対策

社団法人・日本河川協会 1976.3 非売品

- 2)新設堤防の漏水対策工
- 堤体材料として透水性のよい砂, 砂礫, 礫交じり山土を使用する場合は, 均質堤防を避け, 必要に応じて次に示すような漏水対策を考えた新設堤防を築造する. ①築堤材料と築堤断面の決定 川表側あるいは中心部を粘土質の材料でつくる. ②覆土, 止水壁の施工のり面を不透水性の土, コンクリートスラブ, アスファルトスラブ, 石張などの水密性の材料で覆うものである. 不透水性の土は植生が繁茂するよう30cm以上の厚さで被覆する必要がある. コンクリートスラブは堤体変形すると空洞ができるので維持管理に十分注意する. アスファルトスラブは薄いものでは数年間で風化し, また雑草がこれを破って生えることから30~40cmの厚さを持たせるとか, その下に十分な厚さの粘土を張る等の配慮が必要である.
- 3)既設堤防の漏水対策工
- 既設堤防に漏水箇所が判明した場合は, 必要に応じ次のような対策工を施す. ①堤防断面の増大 既設堤防に腹付けや小段を設けて浸透経路長を長くして漏水を防止する. ②止水壁の施工 止水壁には以下に示すものがある. ・鋼矢板による方法 ・粘土壁による方法 矢板を利用した粘土置換工法, スラリトレンチ工法による方法がある. ・薬液注入による方法 ・止水膜による方法 ビニール膜による方法である. ③法覆工の施工 不透水性の土, コンクリートスラブ, アスファルトスラブ, 石張で覆うものである. ④裏法尻付近の補強 漏水箇所の裏のりに空石積み, 空石張り等を施工して, 排水を良好ならしめると同時にのり面の保護を行う.
- 4)堤防地盤の漏水対策工
- 堤防地盤の漏水対策工には各種の工法があり, 地盤条件, 透水層の厚さ, 広がりに応じて最も適切な工法を選択, 施工するものとする.
- ①止水壁を設置する方法 鋼矢板工, コンクリート矢板工, シートウォール工, 粘土壁工, コンクリート壁工, 薬剤注入工, 止水膜工が紹介されている. 鋼矢板工については土木研究所の山村和也の研究成果が取り入れられており, 浸透流量を50%抑えるには, 止水壁は浸透層厚の80~90%を貫入させる必要がある. したがって浸透圧及び漏水量の検討を行い(検討法が提示されている), その効果を確かめてから施工する. 粘土壁やコンクリート壁は我が国で施工された例がない. スラリトレンチ工法は外国でフィルダムの止水対策として連続壁を作った例がある. 砂地盤に溝を掘削し, これに掘削した土砂とベントナイトをセメントと混合したものを埋め戻して止水壁を作る試みがなされており, 止水効果があり確実な工法であると報告されている. 薬注などは作業が容易であるという利点を持つが, 止水効果の面で不明な点が多い. ビニール膜などによる止水工法は止水効果があるが, 作業が非常に困難であり, 耐久性についての検討も必要である.

<参考> 堤防 浸透による被災



出典: JICE資料第1110002号 河川堤防の構造検討の手引き(改定版)

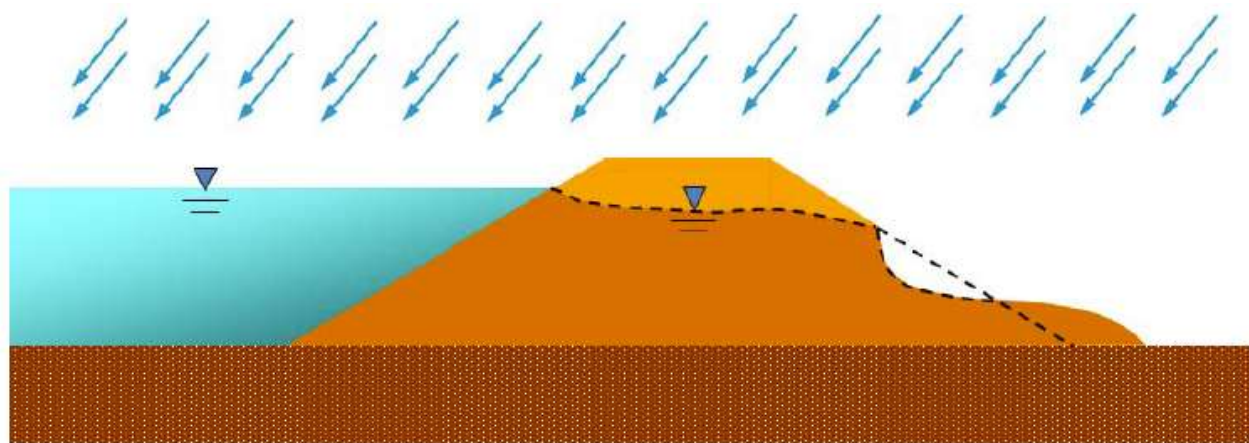
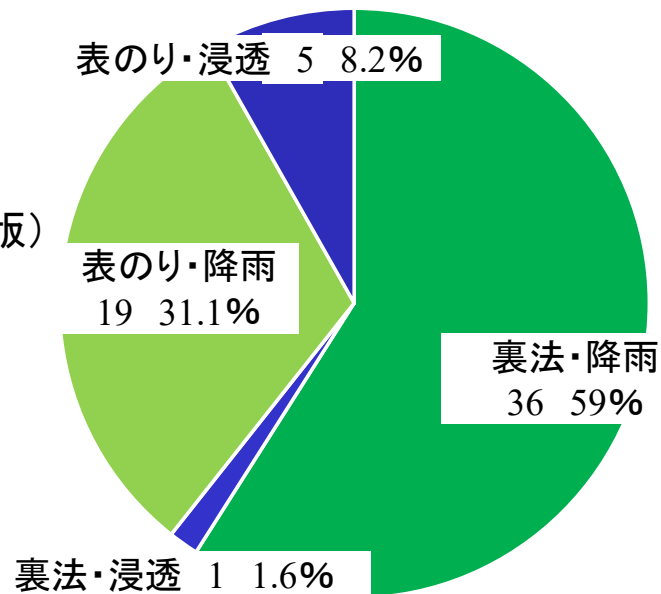


図2.1.1 裏のりすべり

出典: (独)土研 土質・震動チーム 河川堤防の浸透に対する照査のポイント

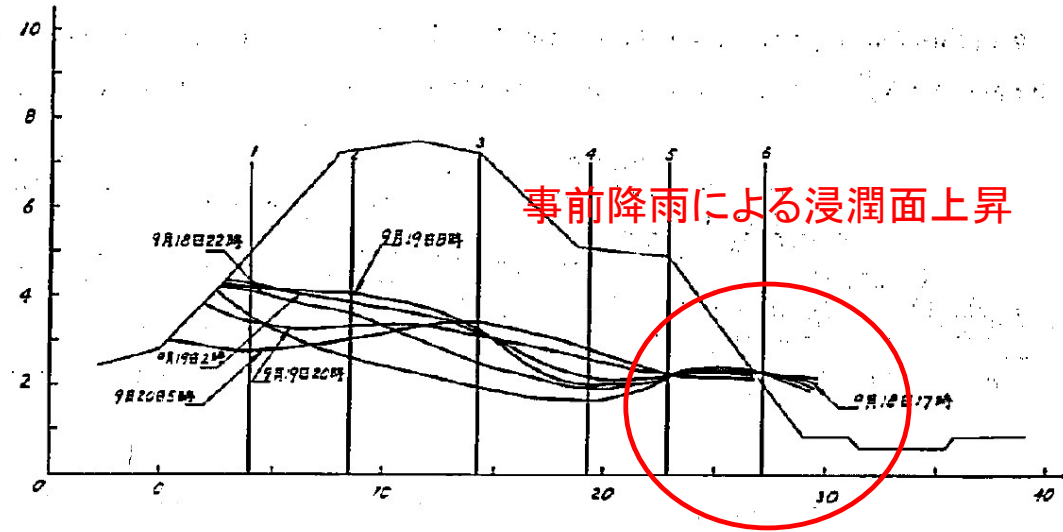
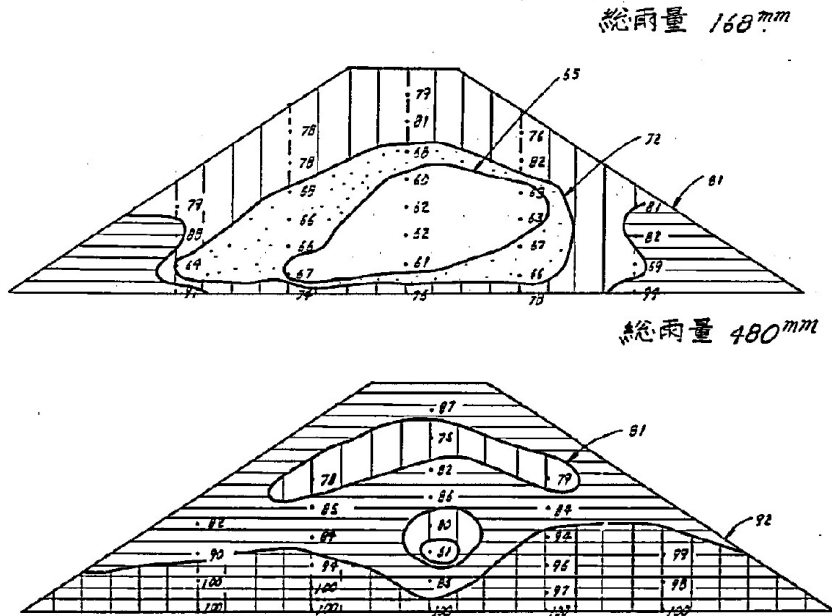
石狩川1981堤防のりすべり61件の内訳

出典: 瀬川(2004)河川堤防の漏水対策技術 第2章河川堤防の災害実態
要因は現在使う用語に変更



- 降雨によると思われるもの
 - 外水浸透によると思われるもの
 - 降雨によると思われるもの
 - 外水浸透によると思われるもの
- 裏のり
- 表のり

大型降雨実験、現地堤防浸透実験、現地浸潤面観測の知見



阿武隈川堤防浸潤面の変化

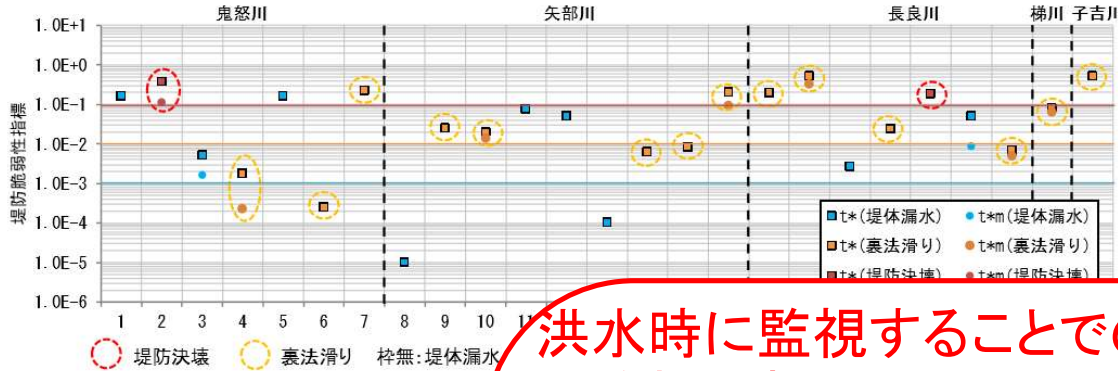
事前降雨が外水浸透を助長、
 事前降雨で外水位により堤体内浸潤面が裏のりに到達するまでの時間を短縮
筑後川では1/10(276時間→28時間)に、江戸川では1/5(300時間→60時間)に
 その要因の1つは、降雨浸透によって表と裏ののり面下に浸潤面の高まりができるため。
 なお、この外水浸透前の表・裏のり面下の浸潤面の高まりは、現行基準の浸透流解析では
 事前降雨を与えることで表現することとしている。

堤防の応答特性(浸透) 超過洪水減災から見た堤防浸透研究の動向 堤体内浸潤面上昇(堤防脆弱性指標 t^*) パイピング堤防破壊の類型

小高・李(2018)

崩壊パターン1: 狭義のパイピング 透水係数比が高い地盤境界面で水みちパイプが形成されるもの。堤体の崩壊に伴って水みちが塞がる場合が多い。

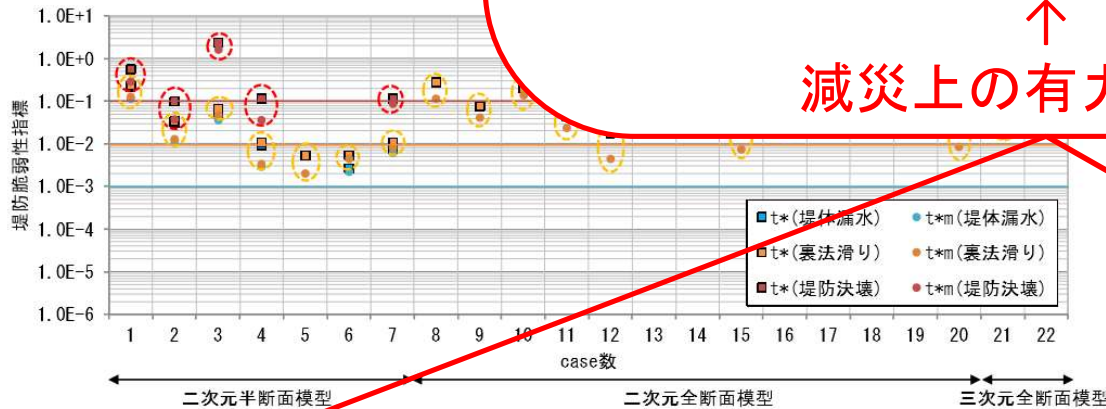
崩壊パターン2: 広義のパイピング 高透水層の上部砂層の有効応力が低下してすべり破壊による崩



洪水時に監視することでのリアルタイムの危険性の指標とできる可能性

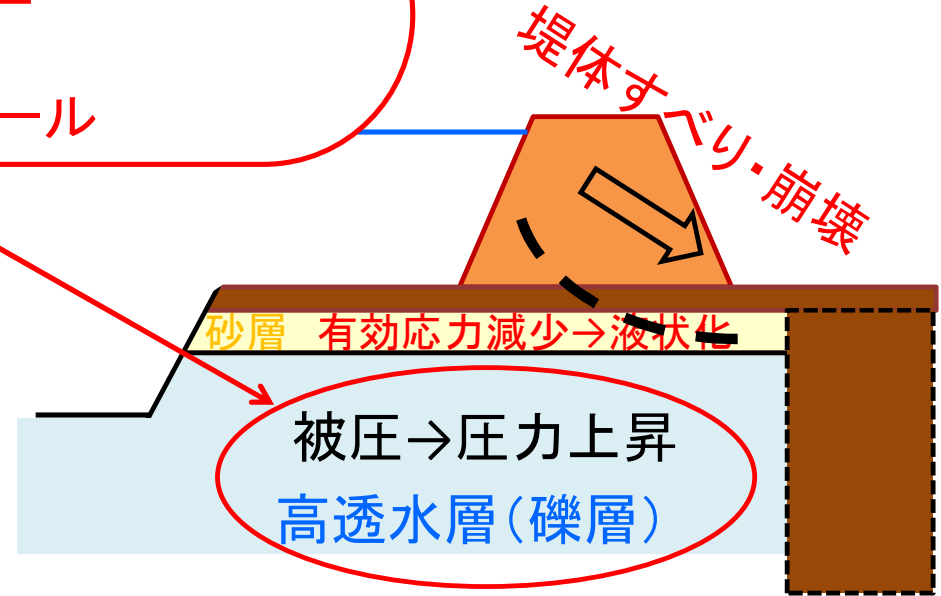
は確認されるが堤体崩壊なし

福岡・田端(2018)



(b) 堤防模型

減災上の有カツール



$$t^* = \frac{1}{S_r} \frac{kHt'}{\lambda b^2}$$

S_r : 飽和度 k : 堤体透水係数 t' : 高水敷冠水経過時間
 H : 洪水流水位 λ : 空隙率 b : 堤体有効敷幅

樋門構造(函体・基礎形式・止水構造)の推移

	函体構造・基礎形式	止水構造	備考
明治時代	木製樋管 4m 近い木杭基礎	門扉両脇胸壁部分に木製止水矢板 止水壁・うなぎ止めなし	
大正年間	鉄筋コンクリート造が半数 直接基礎か木杭基礎	表裏の水叩き前面に止水矢板 函体途中の止水壁・うなぎ止めなし	上平間排水樋管(渡良瀬川) 南河原排水樋管(〃)
昭和初年	鉄筋コンクリート造 短い基礎杭	木矢板(止水矢板)が水叩き前面だけに設置 止水壁・うなぎ止めなし	旧福川水門 (利根川)
終戦後	鉄筋コンクリート造 木杭基礎	木矢板を表裏胸壁部分・水叩き前面に設置 中央部に厚さ0.3mの止水壁らしきものあり	豊田自然排水樋管(小貝川) 函体コンクリート壁にジャンカがあり内外の水・土砂の漏出入
S30年代	鉄筋コンクリート造 短杭基礎	水叩き前面のみ止水矢板 止水壁なし	概念図のような標準図
S40年代	鉄筋コンクリート造 短杭と函体周りのスカート矢板	水叩き前面と胸壁部分に止水矢板 止水壁なし	標準図
1973 (S48) 以降	鉄筋コンクリート造 基礎杭は堅固な支持層につける	水叩き前面及び胸壁部分に加え、函体途中にレーンのクリープ比満足するよう止水矢板設置 函体途中に遮水壁あり	樋門・樋管設計指針(案)
平成10年	鉄筋コンクリート造 原則柔構造(基礎杭なし)	同上	柔構造樋門の手引き 平成11年に新設樋門は原則柔構造とする通達

抜け上がり量が大きいほど 空洞形成割合高い

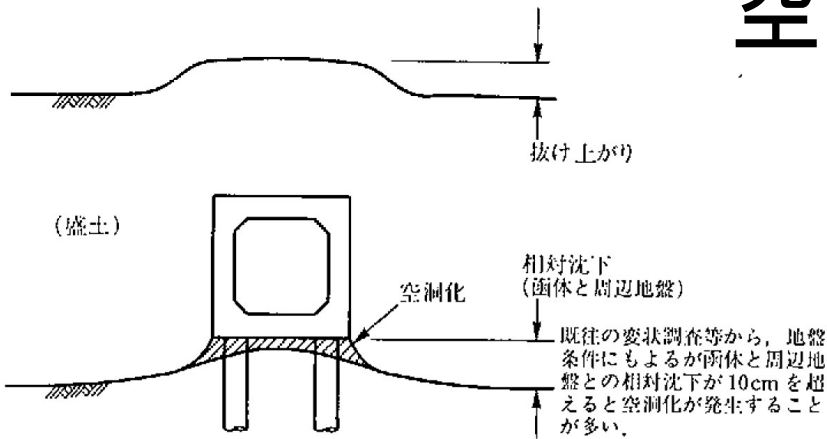


図 1-2-3 杭基礎の函体底版下の空洞化現象

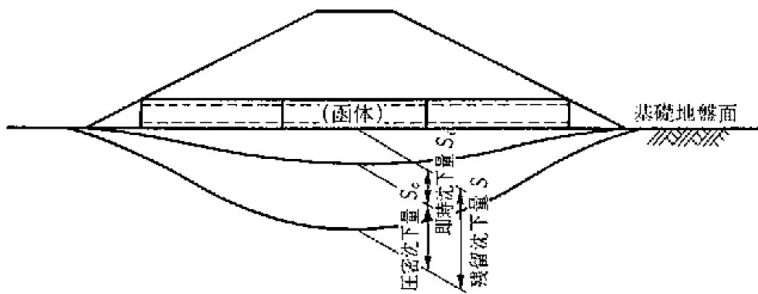
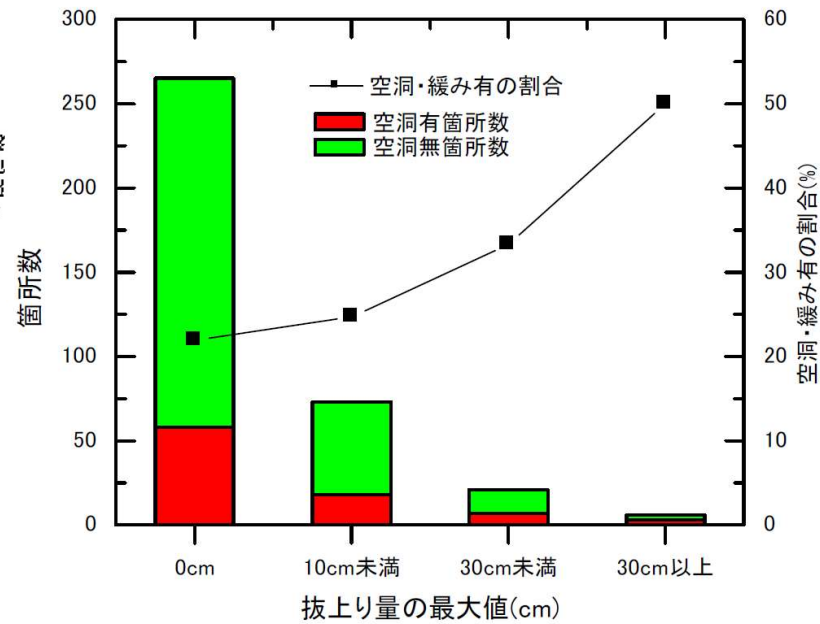


図 1-1-1 地盤の残留沈下量の分布例



出典:石原ら(2014), 樋門等河川構造物周辺の空洞・緩みに係る詳細点研結果の整理, 土木学会第69回年次学術講演会,平成26年9月

不同沈下による樋門変状・破壊

盛土沈下・杭基礎函体沈下せず→空洞・緩みの発生

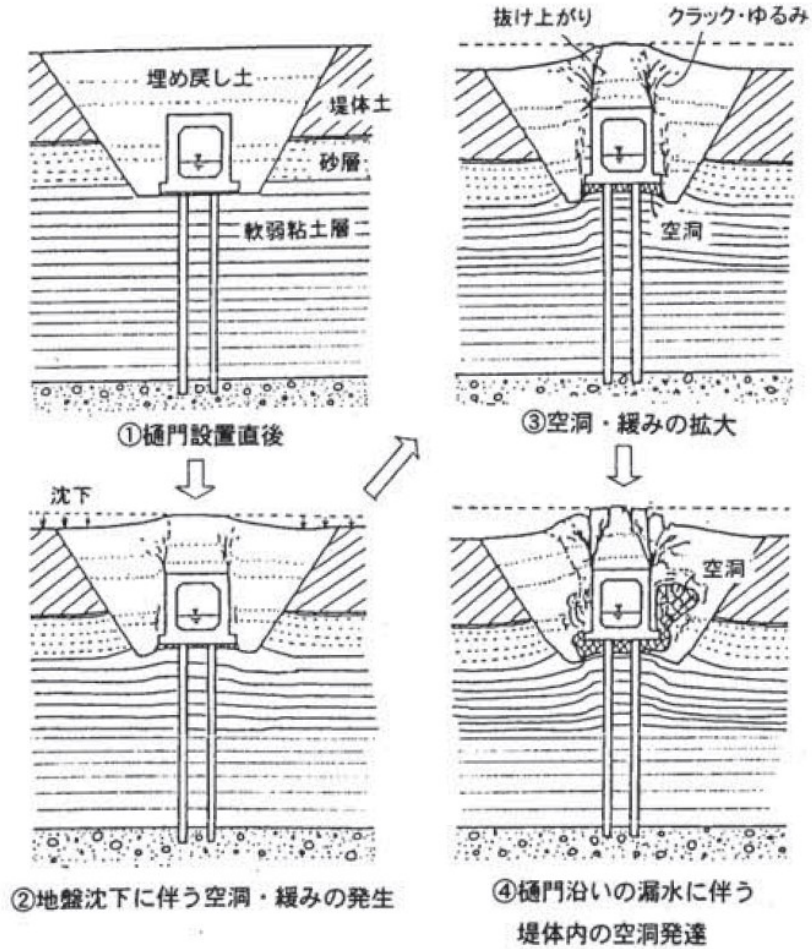


図 7.2.1 樋門の抜け上がりと空洞・クラックの発生の過程¹⁾

出典：河川堤防の構造検討の手引き

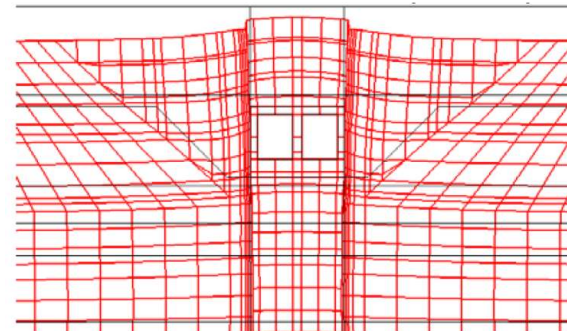
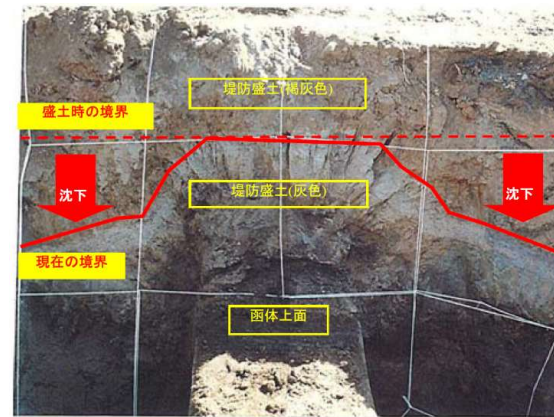


図-4 case 2 の沈下量分布図

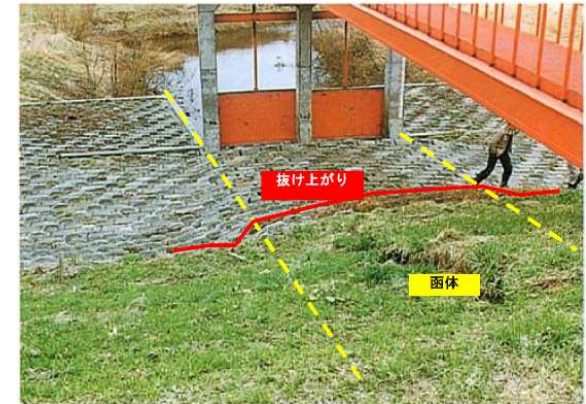


写真-1 杭基礎樋門の抜け上がり状況

出典：瀬川ら(2006), 低湿地堤防における樋門周辺の沈下挙動解析, 土木学会第61回年次学術講演会, 平成18年9月

- 平成30年7月6日23時に堤脚からの漏水を発見
- 漏水は7月7日19時20分に終息

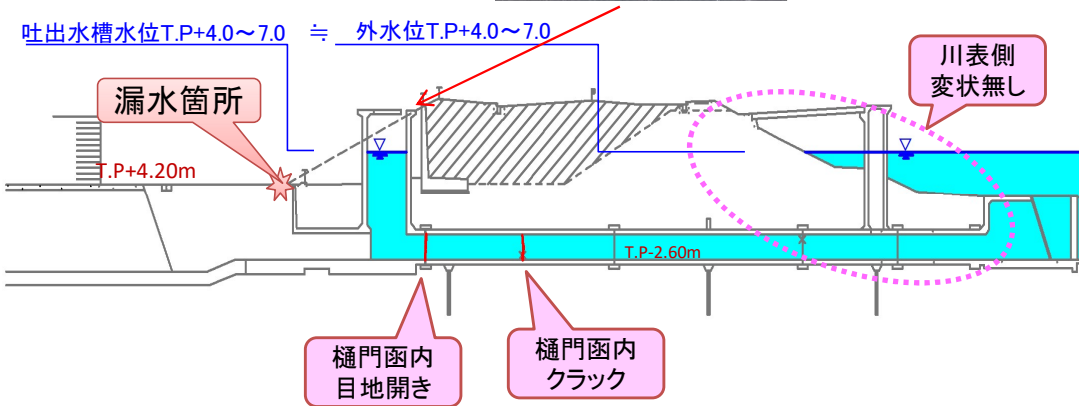


■ ポンプ稼動・外水位・漏水の関係

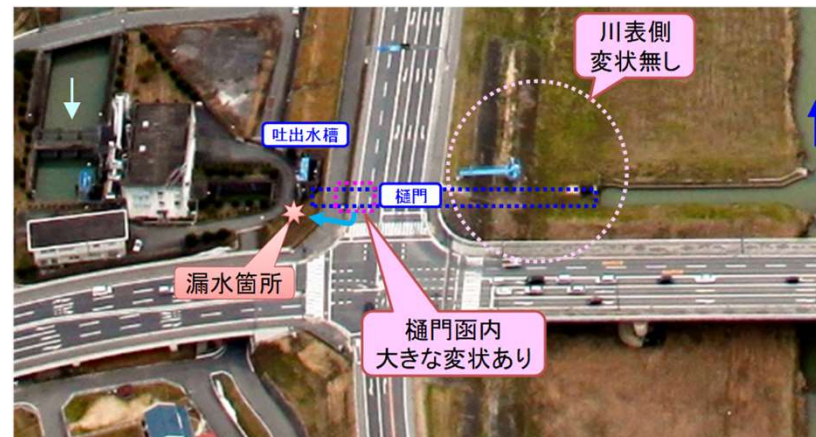
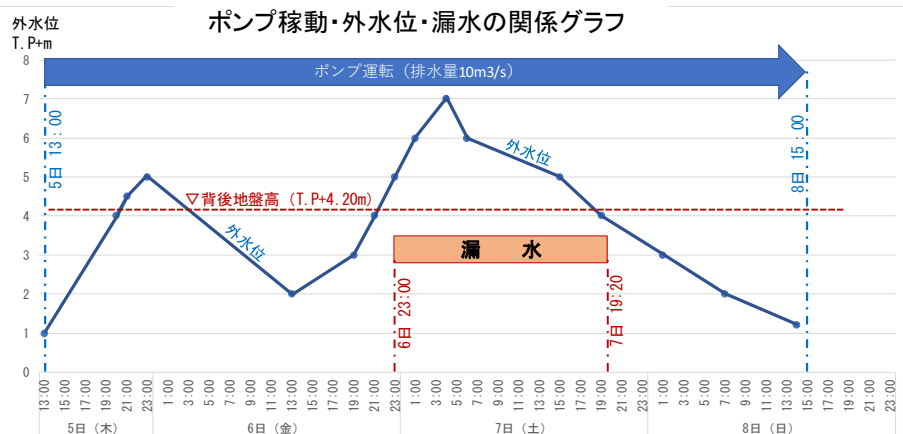
日時	漏水地点状況		ポンプ場状況		外水位 (TP)
	地盤高 (TP4.2)	運転状況	運転状況	排水量 (m ³ /s)	
5日 (木) 13:00		■ 運転開始 ■	■ 運転開始 ■	10 (5×2台)	1.0
20:00	(外水位が上回る)			10 (5×2台)	4.0
21:00				10 (5×2台)	4.5
23:00				10 (5×2台)	5.0
6日 (金) 2:00	(外水位が下回る)			10 (5×2台)	4.2
13:00				10 (5×2台)	2.0
19:00				10 (5×2台)	3.0
21:00	(外水位が上回る)			10 (5×2台)	4.0
23:00	漏水発見			10 (5×2台)	5.0
7日 (土) 1:00				10 (5×2台)	6.0
4:00				10 (5×2台)	7.0
6:00				10 (5×2台)	6.0
15:00				10 (5×2台)	5.0
19:00	(外水位が下回る)			10 (5×2台)	4.0
19:20	漏水終息			10 (5×2台)	3.0
8日 (日) 1:00				10 (5×2台)	2.0
7:00				10 (5×2台)	2.0
14:00				10 (5×2台)	1.2
15:00		■ 運転停止 ■	■ 運転停止 ■	10 (5×2台)	1.2

※外水位は立野観測水位を引用

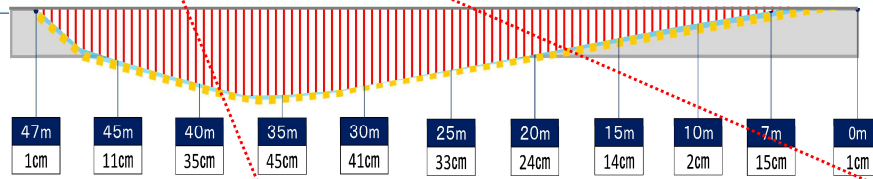
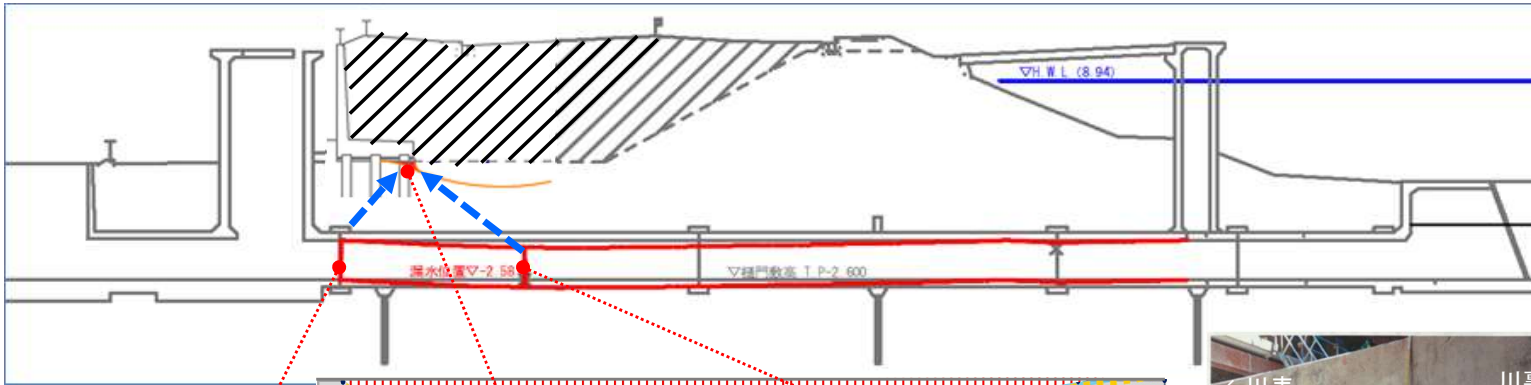
■ 漏水時の水位関係



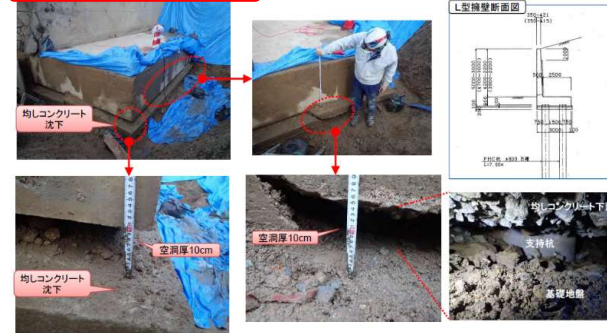
漏水状況(1)



漏水箇所付近の状況



引込み沈下空洞

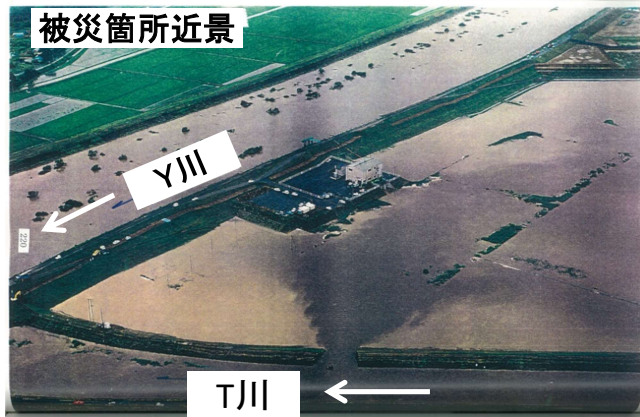


継手開き

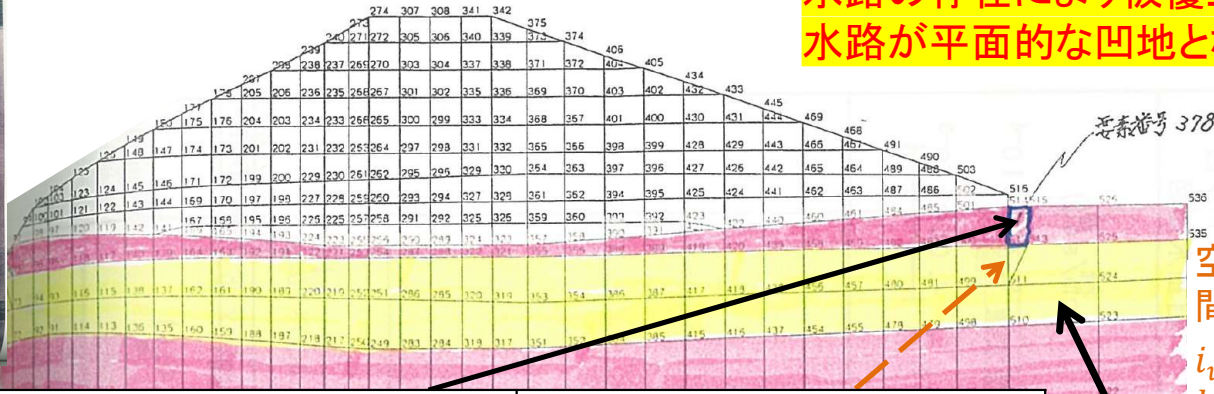


樋門函体に問題がなくとも破堤する場合がある

被災箇所近景

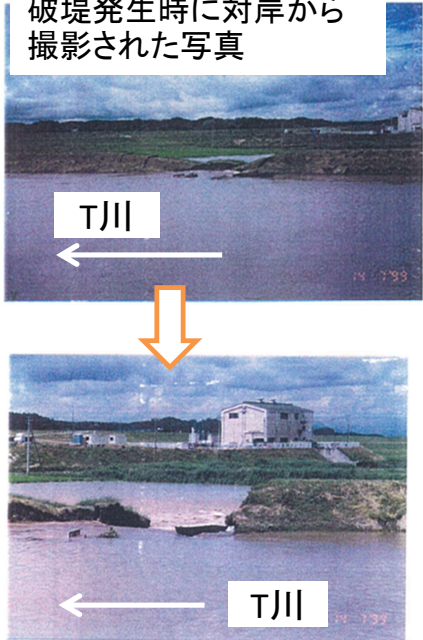


水路の存在により被覆土層欠損
水路が平面的な凹地となって浸透流が集中

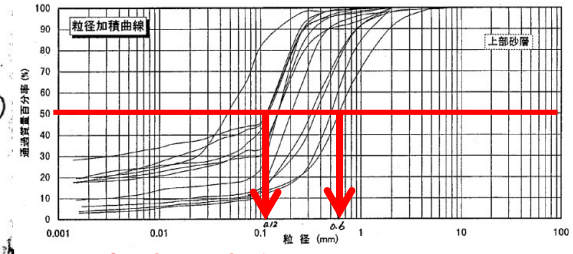
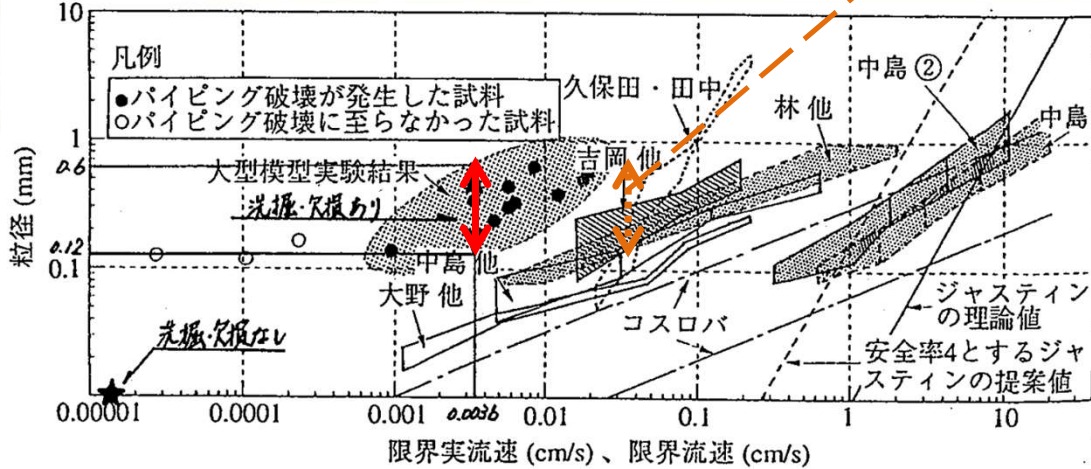


空隙率 $e=0.7$
間隙率 $n=0.412$
 $i_v = 1.057$
 $k = 0.01 \text{ cm/s}$
 $v_{ps} = (ki)/(1 - (1 - n)^{2/3}) = 0.0355 \text{ cm/s}$

破堤発生時に対岸から撮影された写真



要素番号	水路なし断面			水路有断面		
	流速ベクトル (cm/s)			流速ベクトル (cm/s)		
	実流速	水平成分	鉛直成分	実流速	水平成分	鉛直成分
378	1.34×10^{-5}	9.8×10^{-8}	1.34×10^{-5}	3.59×10^{-3}	1.57×10^{-4}	3.58×10^{-3}



上部砂層 粒径 $d_{50} = 0.12 \sim 0.6 \text{ mm}$

出典: 三木博史, 山田哲也ら「堤防基礎地盤パイピング破壊基準に関する考察」, 土木技術資料 37-12, 1995年

西村ら(2019):パイピング危険度力学点検フロー

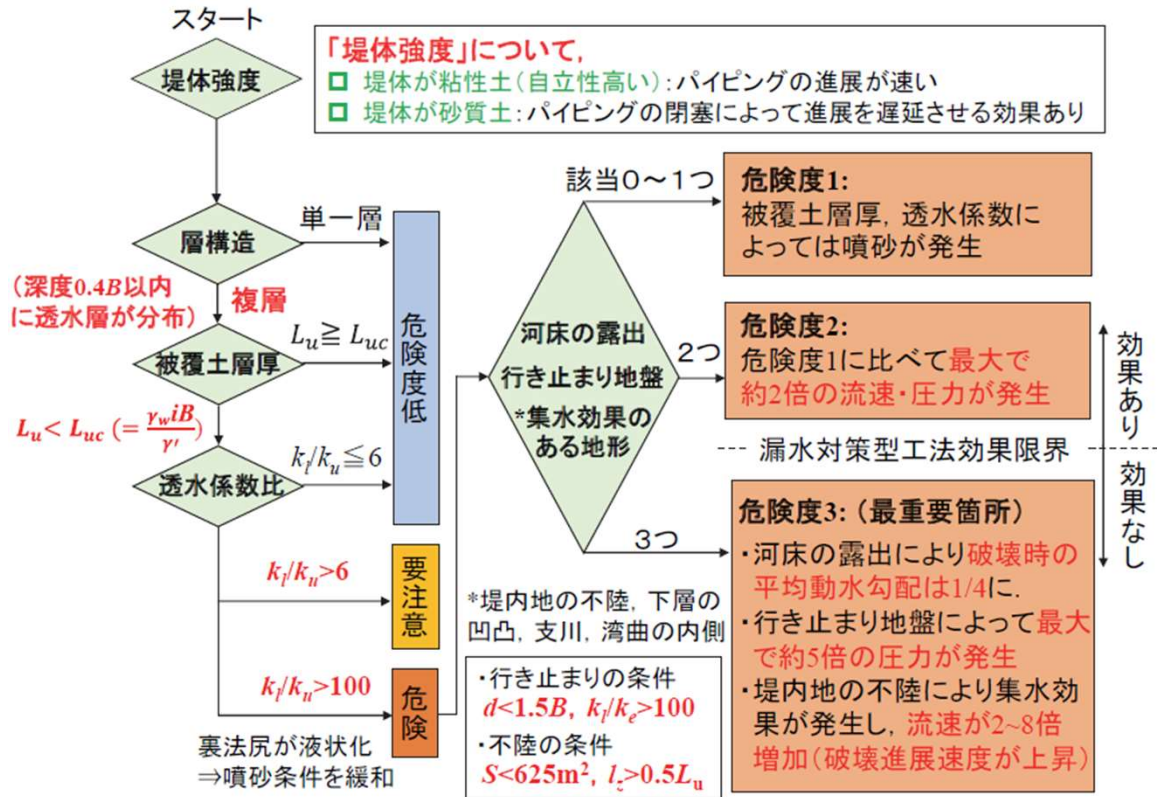


図-12 河川堤防のパイピング危険度の力学的点検フロー

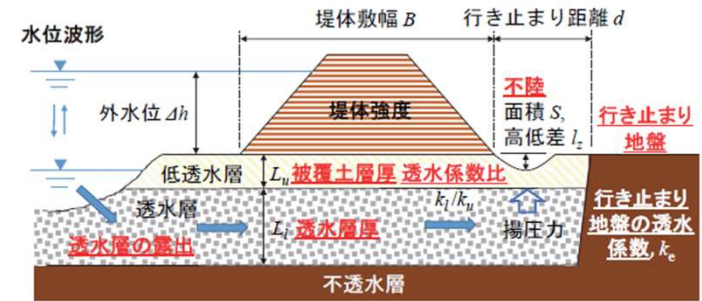


図-13 着目すべき堤体-基礎地盤条件

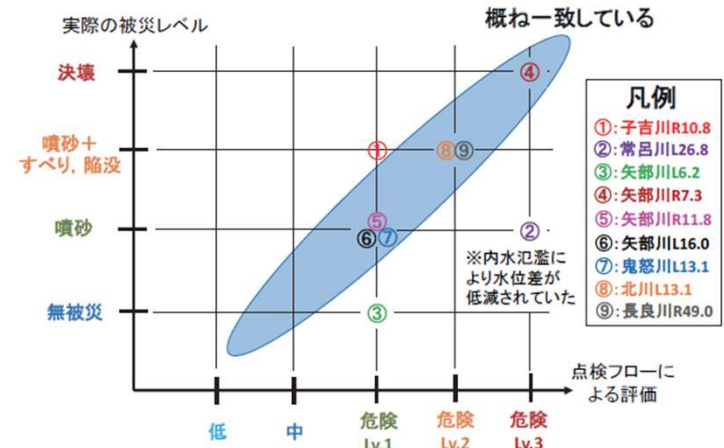
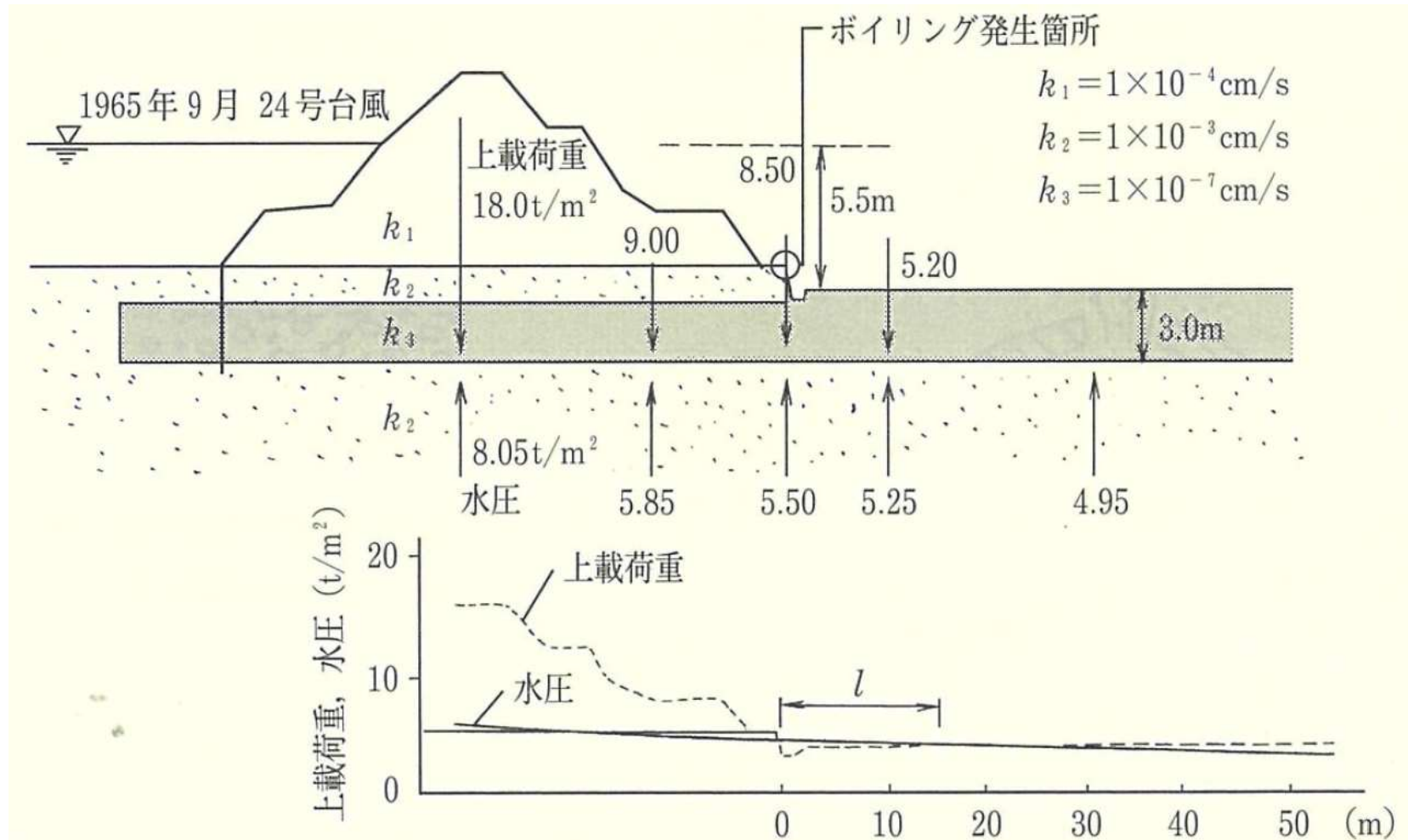


図-14 実際の被災事例と点検フローによる評価の比較

出典:西村 柁哉, 前田 健一, 高辻 理人, 牧 洋平, 泉 典洋:実堤防の調査結果に基づいた河川堤防のパイピング危険度の力学的点検フローの提案, 河川技術論文集第25巻, p. 499-504, 2019年

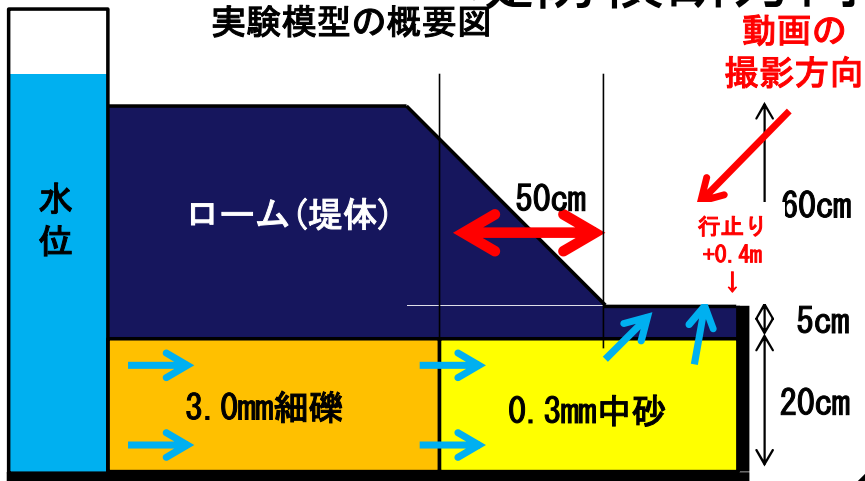
Y川ボイリングによる堤防損傷事例 難透水層の被圧状況推定



出典: 中島秀雄(2003), 図説 河川堤防 5.3.7パイピング, ボイリングとクリープ比 図-5.49, 技法堂出版, p104, 2003.9

濁った水が激しく噴き出す実験例2(抽出実験) 堤防横断方向に複層構造でも決壊・破堤に至る

実験模型の概要図



パイピング破壊は被圧する浸透経路条件なら単層に見える土層構造でも起きる



<参考> 堤防 浸透による被災 パイピング

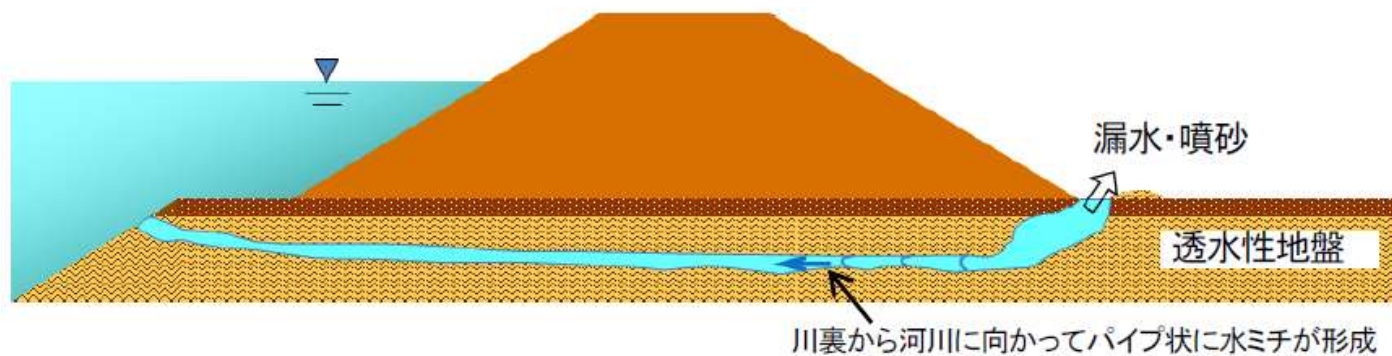


図2.1.2 パイピング

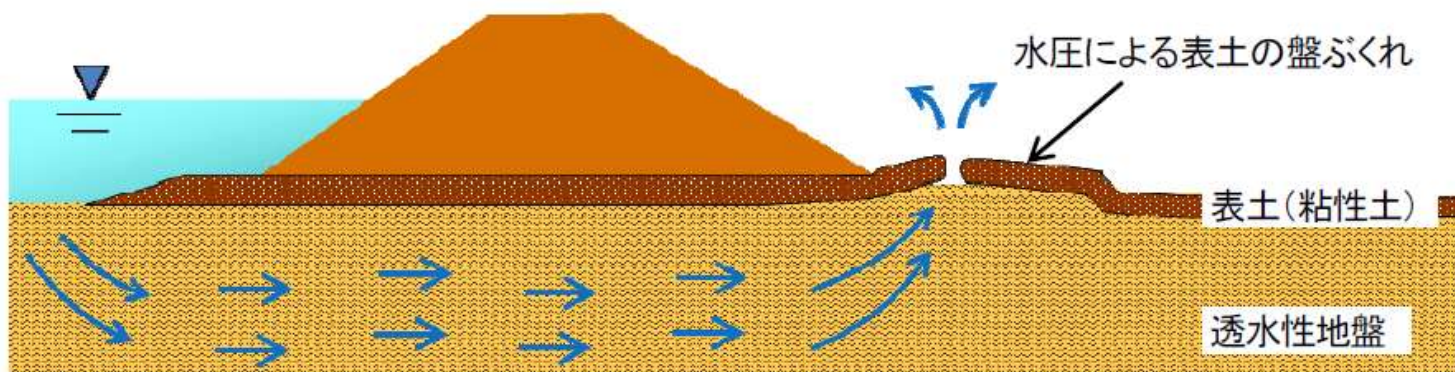


図2.1.3 揚圧力による表土の盤ぶくれ

大型実験を見る限り、
水ミチパイプは砂層の中心
ではなく、砂層と上の
低透水層の境界に発生

出典:(独)土研 土質・震動チーム 河川堤防の浸透に対する照査のポイント

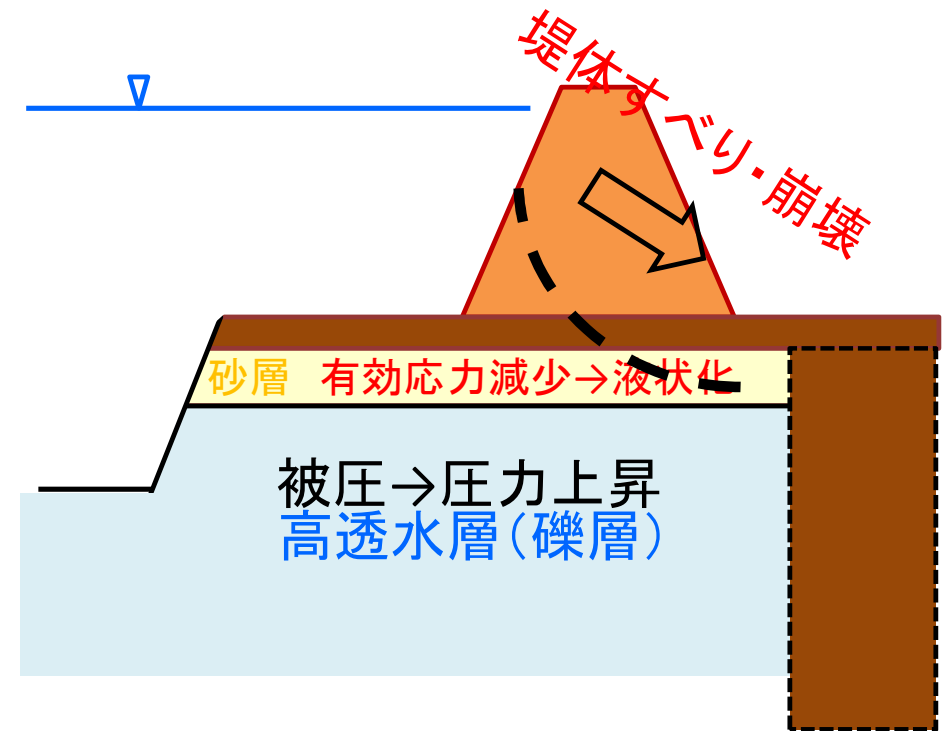
パイピング堤防破壊の類型

小高・李(2018)

崩壊パターン1: 狭義のパイピング 透水係数比が高い地盤境界面で水みちパイプが形成されるもの。堤体の崩壊に伴って水みちが塞がる場合が多い。

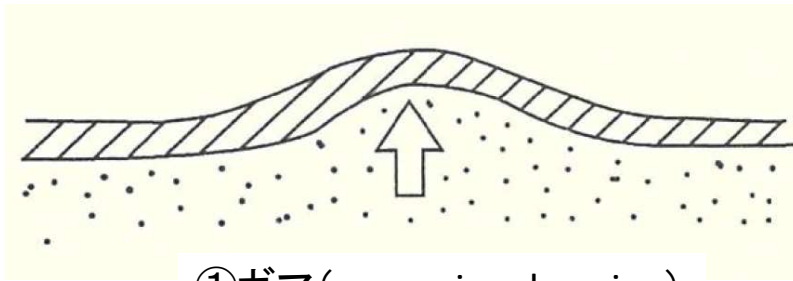
崩壊パターン2: 広義のパイピング 高透水層の上部砂層の有効応力が低下してすべり破壊による崩壊を起こすもの。

崩壊パターン3: 漏水は確認されるが堤体崩壊なし

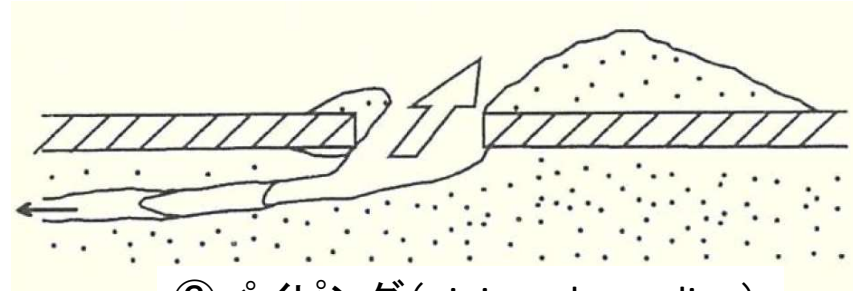


浸透による土粒子の移動で起きる現象を表す用語

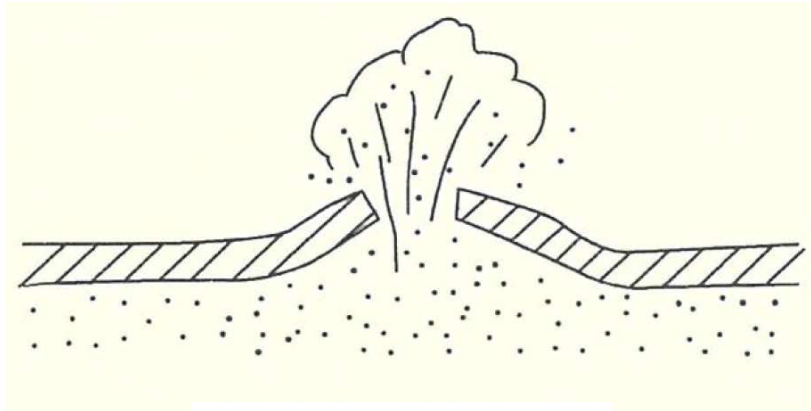
出典：中島秀雄(2003), 図説 河川堤防 5.3.7パイピング, ボイリングとクリープ比, 技法堂出版, p103, 2003.9



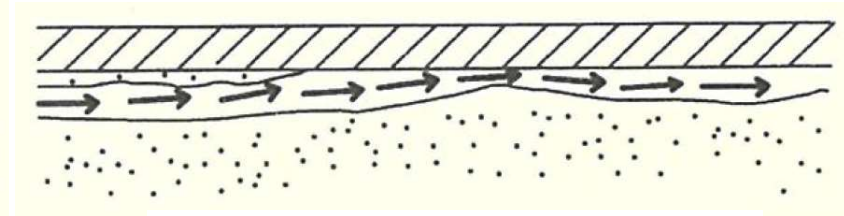
①ガマ (expansion, heaving)



③パイピング (piping, channeling)



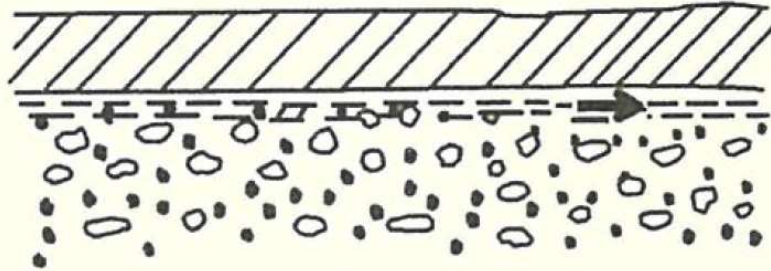
②ボイリング (boiling)



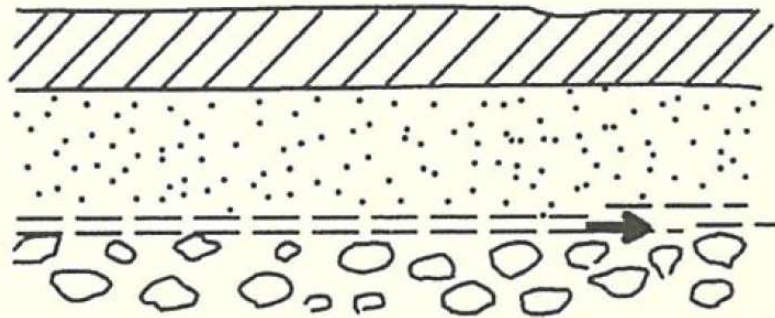
④浸透破壊 (hydrologic fracture)

パイピングが生じやすいと考えられる条件

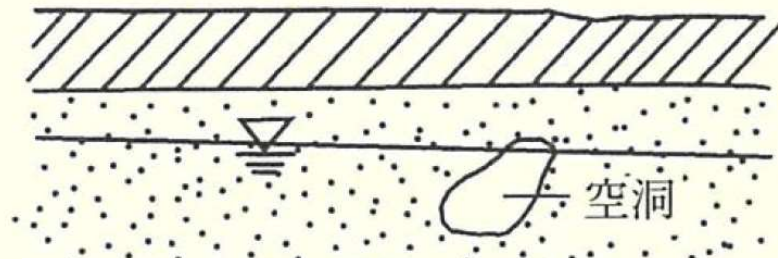
出典: 中島秀雄(2003), 図説 河川堤防 5.3.7パイピング, ボイリングとクリープ比, 技法堂出版, p103-104, 2003.9



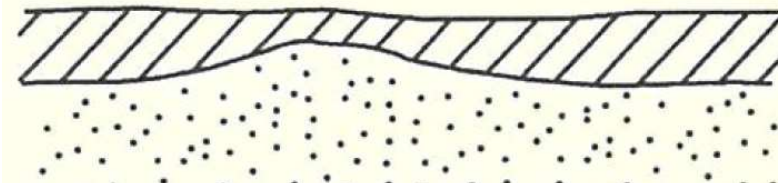
(2)重なっている2層の透水性に大きな差がある基礎地盤からなっている場合



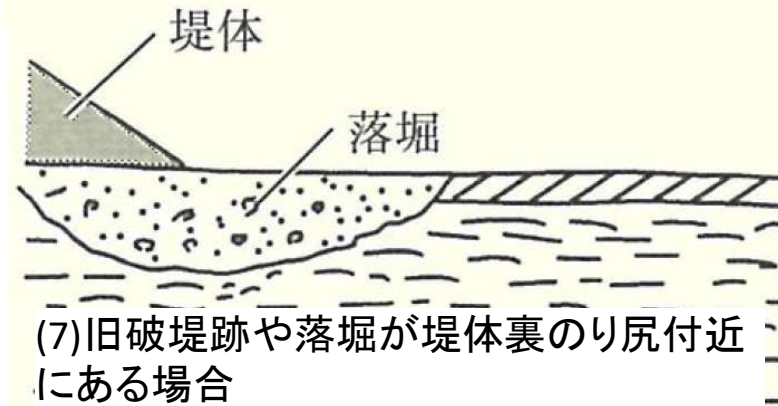
(3)透水性の良好な粒径で異質な2層が重なっている基礎地盤からなっている場合



(4)地下水位以下や地下水面付近に小規模な空洞がある場合



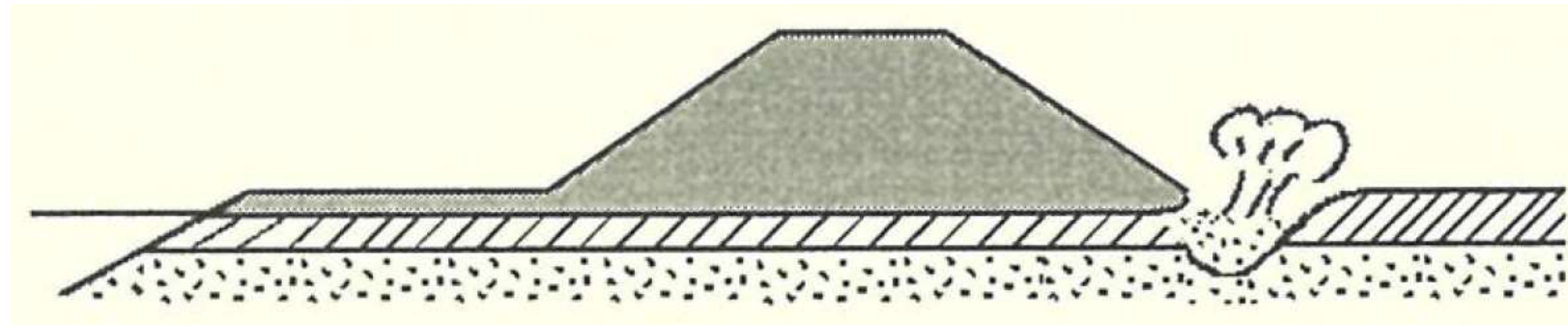
(5)堤内地の表土が薄い場合
((上図の他にも)水路・池・旧河道等)



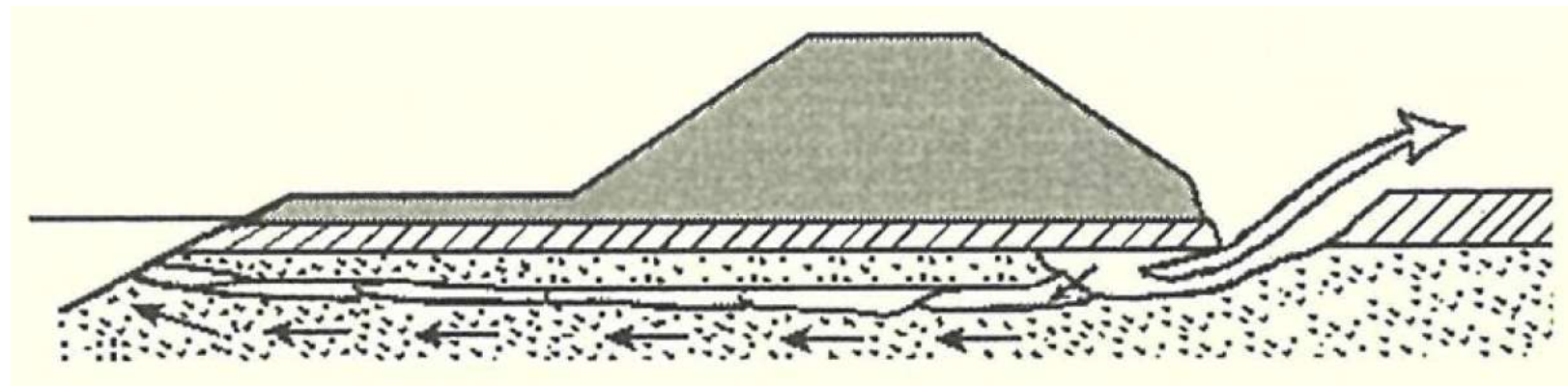
(7)旧破堤跡や落堀が堤体裏のり尻付近にある場合

Y川パイピング発生機構の推定

出典: 中島秀雄(2003), 図説 河川堤防 5.3.7パイピング, ボイリングとクリープ比, 技法堂出版, p105, 2003.9

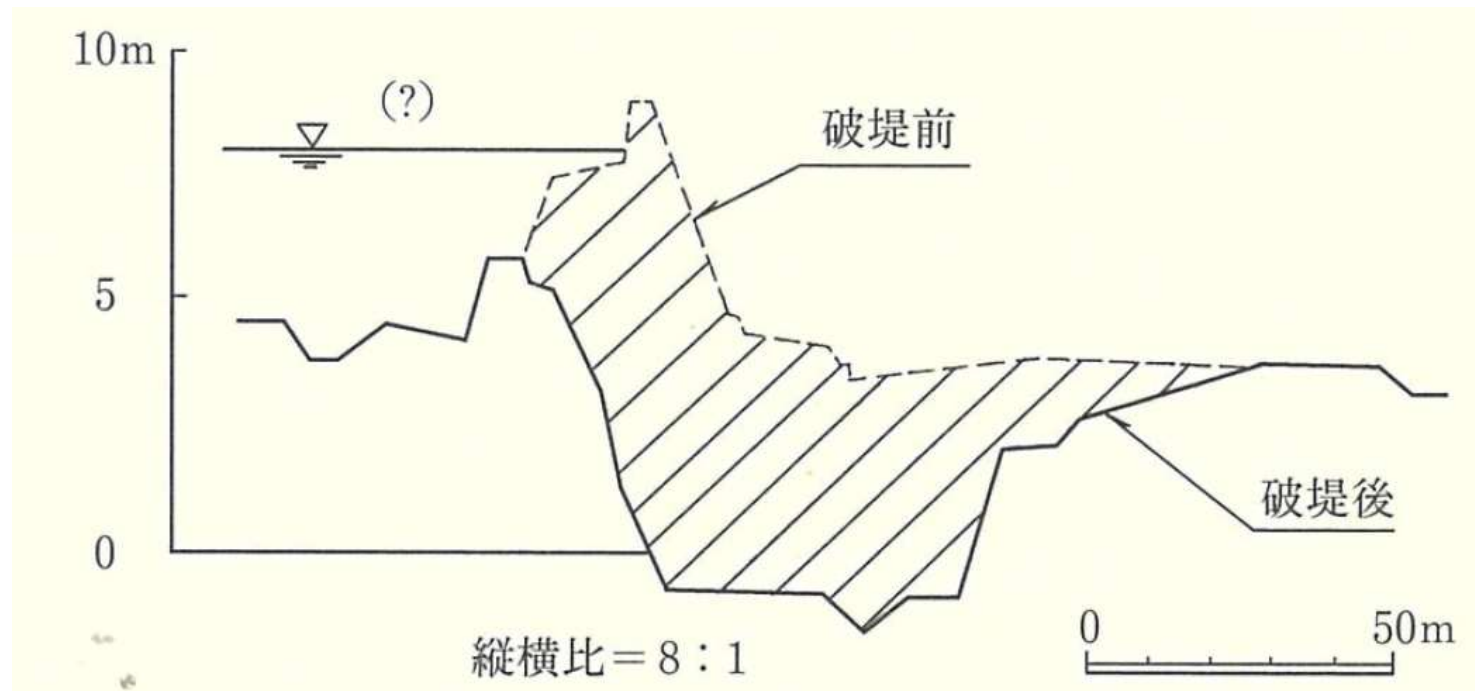


ボイリングー裏のり尻付近のボイリングで空洞ができる



パイピングー川表側に向かって空洞が進み貫通する。この段階で大量の水による空洞の拡大が進み、堤防が陥没する危険が生じる

パイピング破堤発生事例 〇川

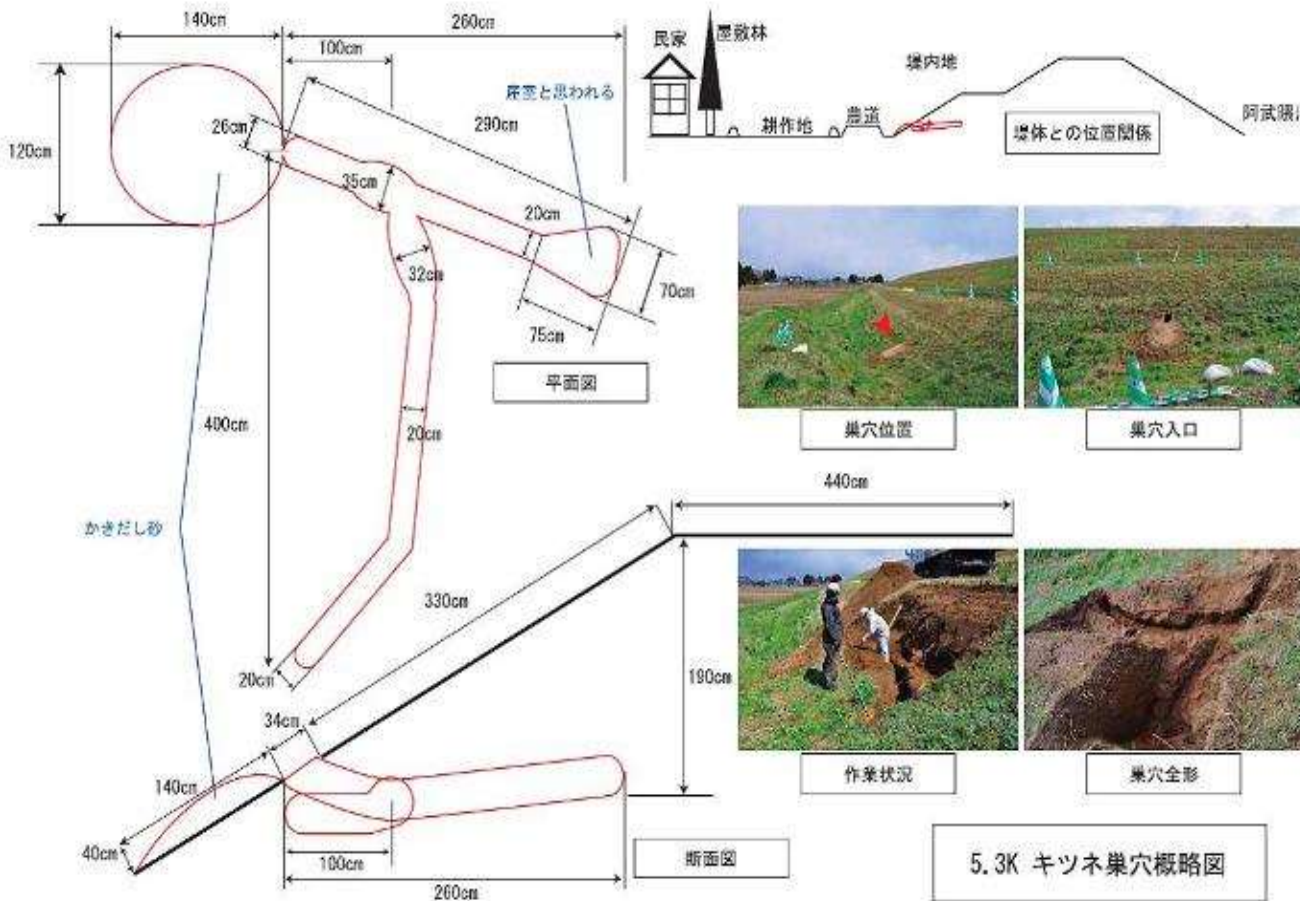


パイピングによる破堤前後の断面図

- 破堤直前に**大量の水を裏法尻から吹き上げていた。**
- その後**堤防が縦断方向に弓形に沈下し、直後に横断方向に堤体が落ち込み、水が噴き出し決壊した。**

出典：中島秀雄(2003),図説 河川堤防 5.3.7パイピング,ボイリングとクリープ比 図-5.59,技法堂出版,p112,2003.9

動物損傷(キツネ巣穴等)



キツネ・アナグマ・ウサギ
漏水・浸透破堤を助長する懸念

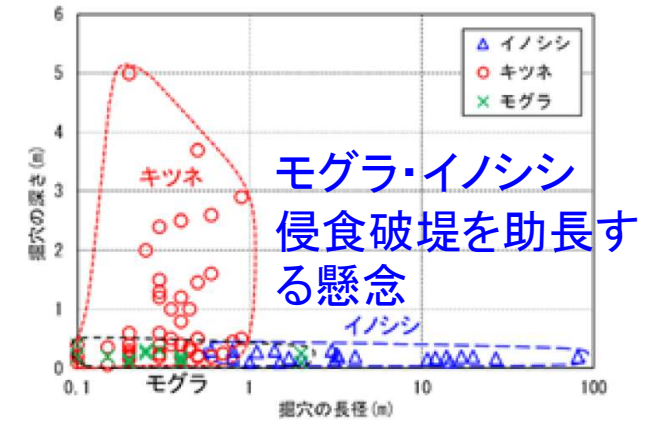


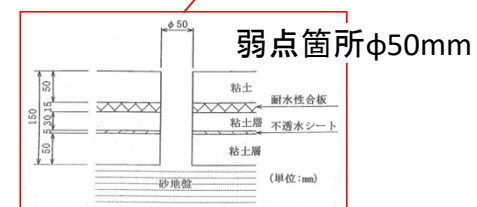
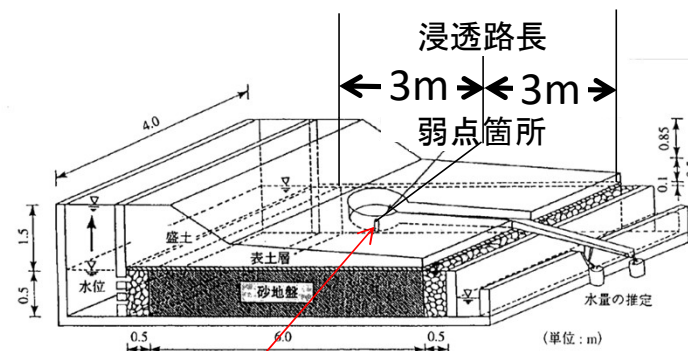
図 4-1 対象動物別の掘穴の形状・規模の傾向

↑ 出典: 田島ら(2018)に加筆: 河川堤防における動物の巣穴・掘り起こしに関する点検及び評価方法の提案～種ごとの特徴と影響度合いを考慮した維持管理法の構築に向けて～, 河川総合研究所報告, Vol.24,p1-14

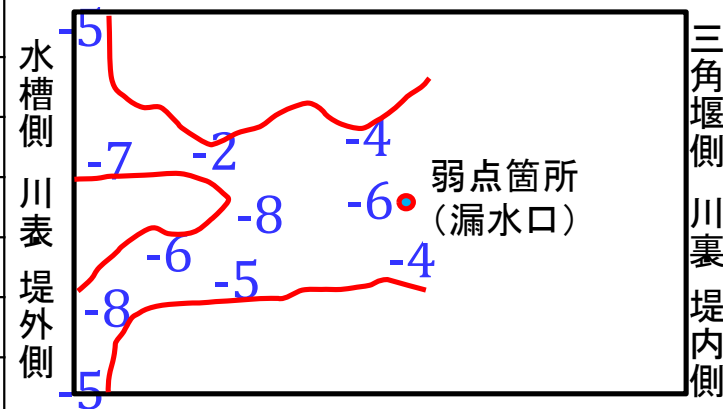
↑ 出典: 国交省仙台河川国道事務所岩沼出張所(2010): 岩沼出張所, 独自の取り組み キツネ穴対応, 平成22年

三木ら1996大型実験

実験ケース		貫通		砂材料粒径(mm)				空隙比e
No.	材料採取地	弱部	砂層	d_{10}	d_{30}	d_{50}	d_{60}	
15	霞ヶ浦・美浦	○	○	0.233	0.385	0.563	0.67	0.65
16	鬼怒川	○	○	0.13	0.249	0.393	0.504	0.61
17	利根川	○	○	0.147	0.257	0.324	0.361	0.69
18	江戸川・シルト混	—	—	0.0198	0.159	0.243	0.284	0.61
19	霞ヶ浦・麻生1	○	○	0.0766	0.121	0.151	0.167	0.69
20	玉造	○	○	0.117	0.16	0.207	0.239	0.61
21	鬼怒川	○	—	0.243	0.429	0.632	0.764	0.62
22	霞ヶ浦・麻生2	○	—	0.192	0.288	0.369	0.426	0.63
23	利根川下流	—	—	0.0052	0.051	0.121	0.157	0.72
24	長良川	○	○	0.185	0.274	0.341	0.38	0.66
25	霞ヶ浦・西ノ州	○	○	0.191	0.356	0.571	0.73	0.58
26	江戸崎	○	○		0.0079	0.0313	0.0524	0.73
27	小貝川・吉沼	—	○	0.0054	0.0589	0.163	0.221	0.66
28	渡良瀬川	○	—	0.213	0.324	0.439	0.528	0.63



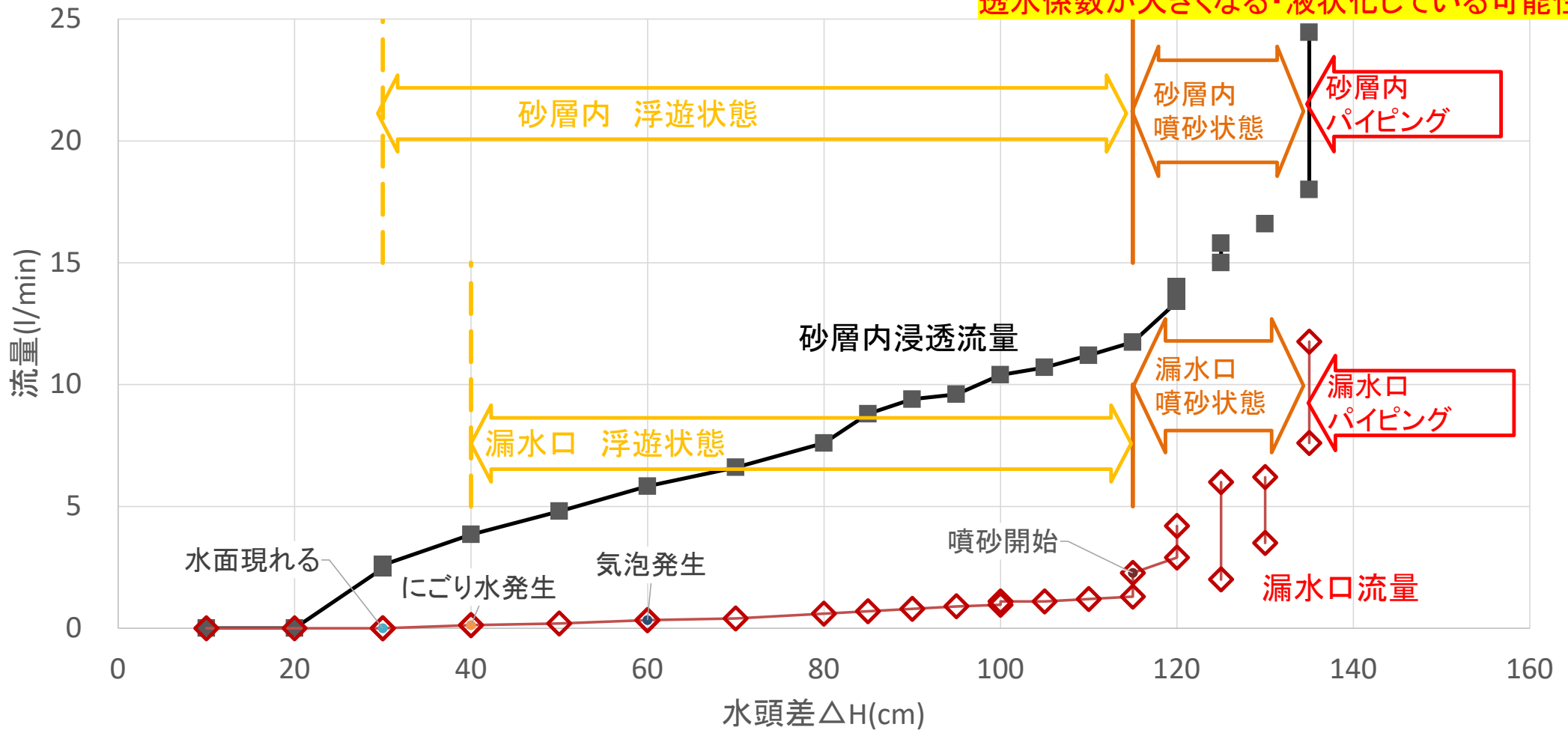
ケース15
水ミチ空洞深さの計測結果(単位: mm)



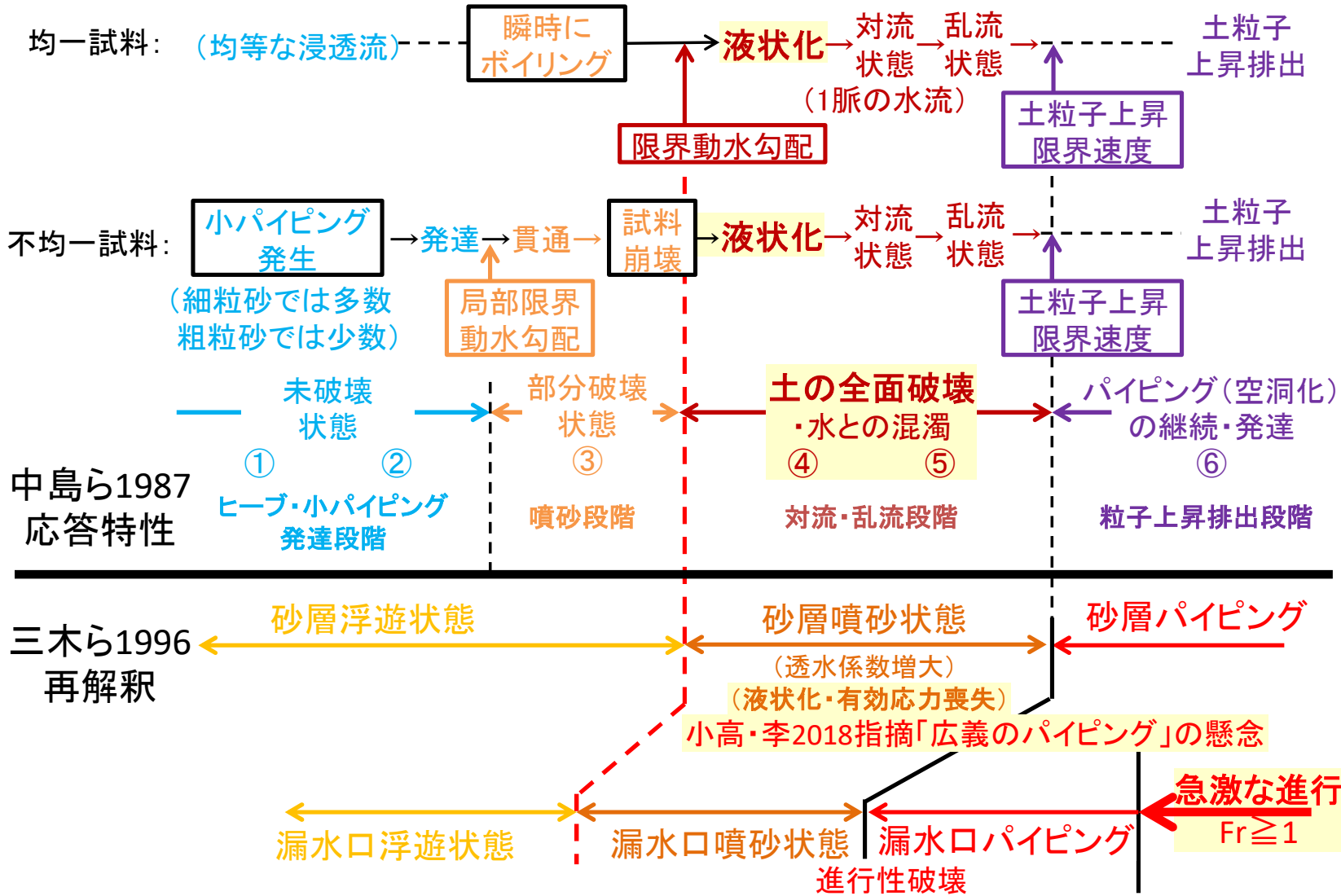
パイピングの砂粒子応答特性 **砂層は砂粒子の状態が変化**

三木ら1996 大型実験 ケース15 弱部からのパイピング貫通と砂層貫通混在

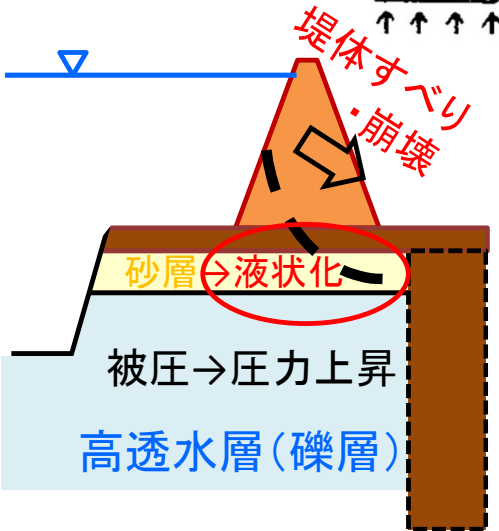
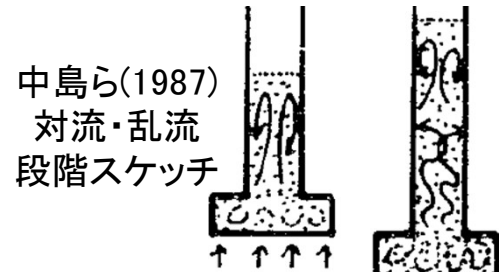
透水係数が大きくなる・液状化している可能性がある



パイピング砂層地盤・砂粒子の応答状態



小高・李(2018)
崩壊パターン2: 広義のパイピング 高透水層の上部砂層の有効応力が低下してすべり破壊による崩壊を起こすもの。

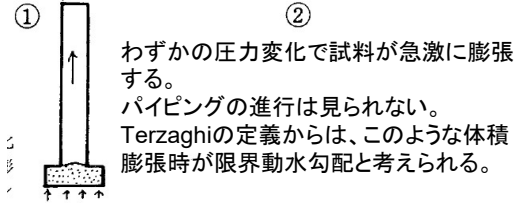


浸透破壊の現象経過観察、土粒子上昇限界速度(1)

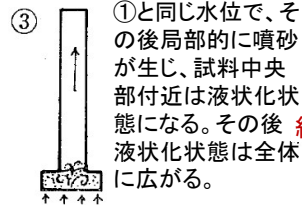
出典: 中島秀雄・長瀬迪夫・飯島豊(1987),X線を用いた土の浸透破壊実験とその考察 図-21,応用地質年報,No.9,p21-p41,1987

ヒープ・小パイピング発達段階

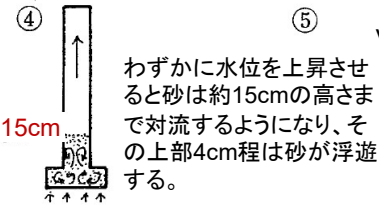
細粒砂 0.074-0.11mm



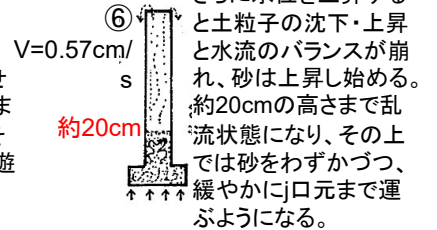
噴砂段階



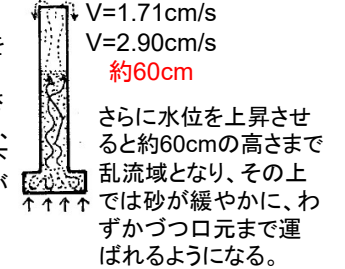
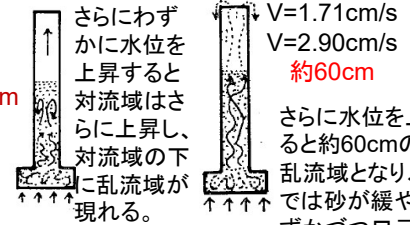
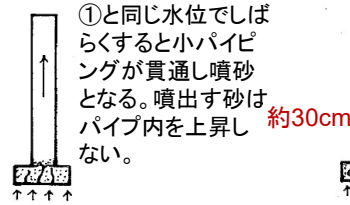
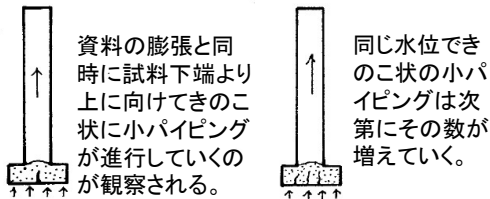
対流・乱流段階



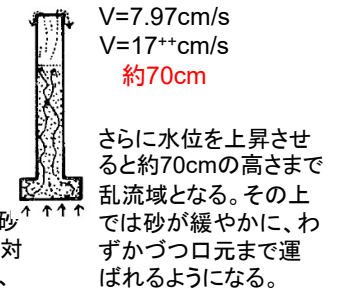
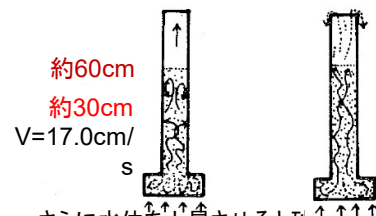
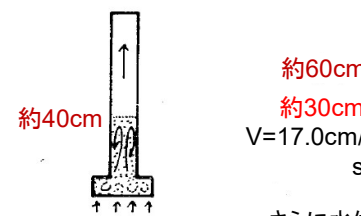
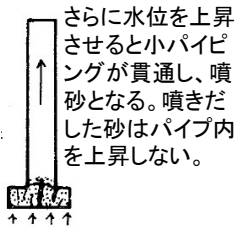
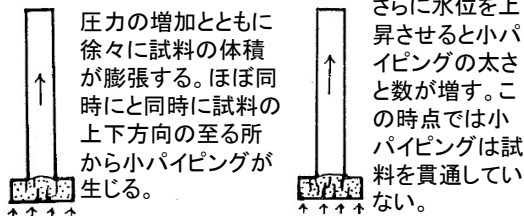
粒子上昇排出段階



中粒砂 0.11-0.25mm 0.25-0.42mm



粗粒砂 0.42-0.85mm 0.85-2.00mm



1. 体積膨張に幅がある。
2. 累計流量と動水勾配の曲線の折点が明瞭である。

未破壊状態

① ②

部分破壊状態

③

土の全面破壊・水との混濁

④

パイピング(空洞化)の継続・発達

⑤ ⑥

浸透破壊の現象経過観察、土粒子上昇限界速度(2)

出典: 中島秀雄・長瀬迪夫・飯島豊(1987), X線を用いた土の浸透破壊実験とその考察 図-21, 応用地質年報, No.9, p21-p41, 1987

対流・乱流段階

粒子上昇排出段階

細粒砂
0.074-0.11mm



$V=0.10\text{cm/s}$

密な対流



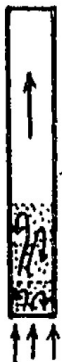
$V=0.27\text{cm/s}$

上昇

対流

わずかな流量増加で砂は対流状態から乱流状態に変わる。
パイプ内の水の流れは穏やかである。

中粒砂
0.11-0.25mm
0.25-0.42mm



$V=1.20\text{cm/s}$

密な対流



$V=2.40\text{cm/s}$

粗な対流

乱流
砂流



上昇

$V=4.70\text{cm/s}$

対流

$V=10.0\text{cm/s}$

細粒砂と比較して大幅に流量が増加しないと砂は上昇してゆかない。
パイプ内の水の流れは乱れている。

土の全面破壊・水との混濁

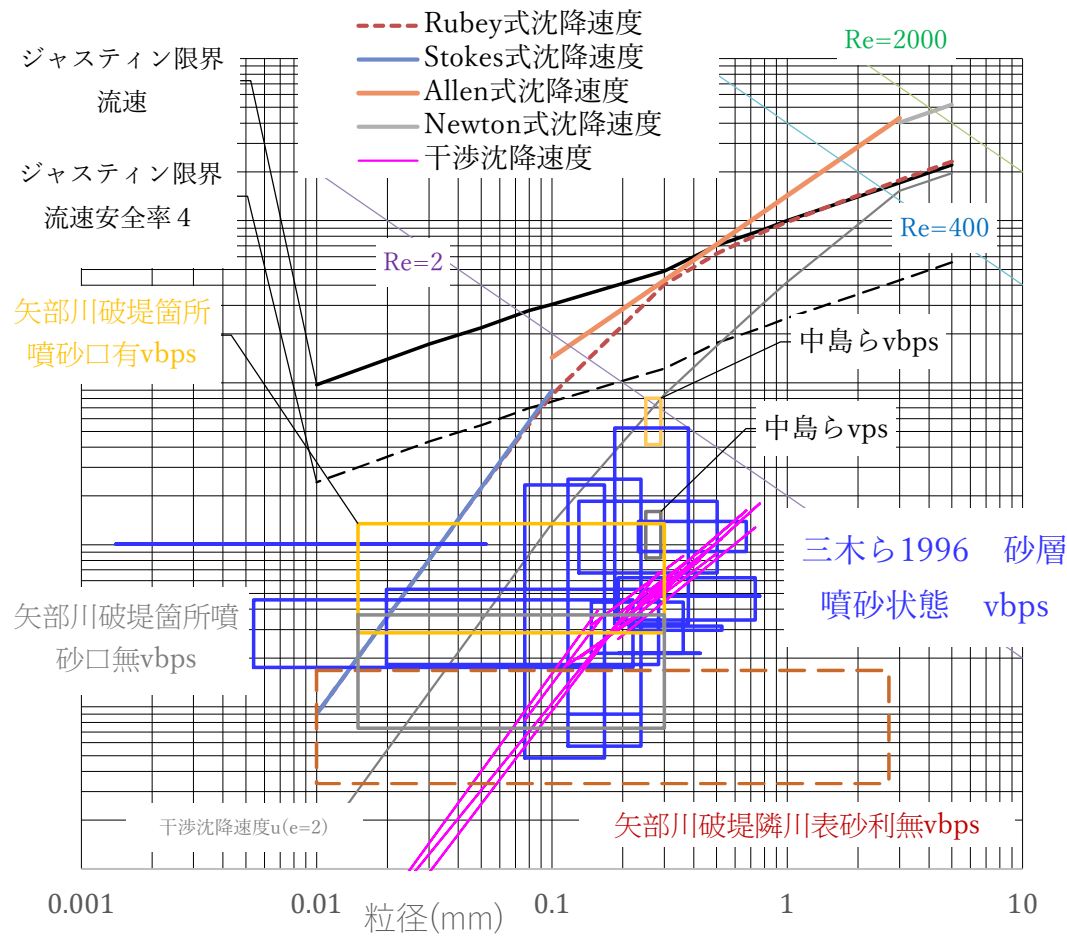
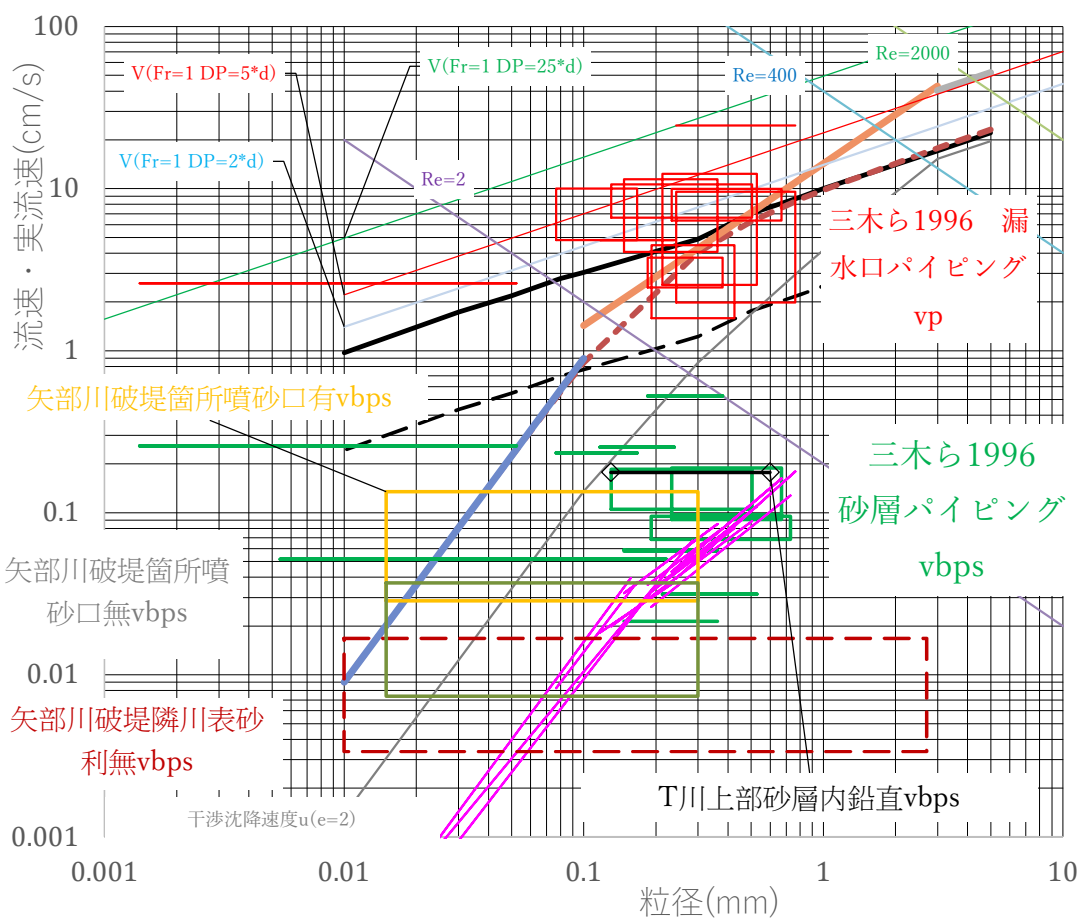
④

パイピング(空洞化)の継続・発達

⑥

三木ら1996砂層 v_{bps} 応答整理結果

パイピング(左) 噴砂状態(右)



偏り考慮砂層内実流速 v_{bps} と 干渉沈降速度 u の算定方法

$$v_{bs} = 5v_s \quad (4)$$

$$v_{bps} = v_{bs} / (1 - (1 - n)^{2/3}) \quad (5)$$

$$e = n / (1 - n) \quad (6)$$

v_{bs} : 偏り考慮砂層内流速

v_s : 砂層内浸透流速

v_{bps} : 偏り考慮砂層内実流速

e : 空隙比

n : 空隙率

$$u/w_0 = (1 - \varphi)^n \quad (1)$$

$$\varphi = 1 / (1 - e) \quad (2)$$

$$n = 4.65 \quad R_e < 0.2 \quad (3-1)$$

$$n = 4.4R_e^{-0.03} \quad 0.2 < R_e < 1 \quad (3-2)$$

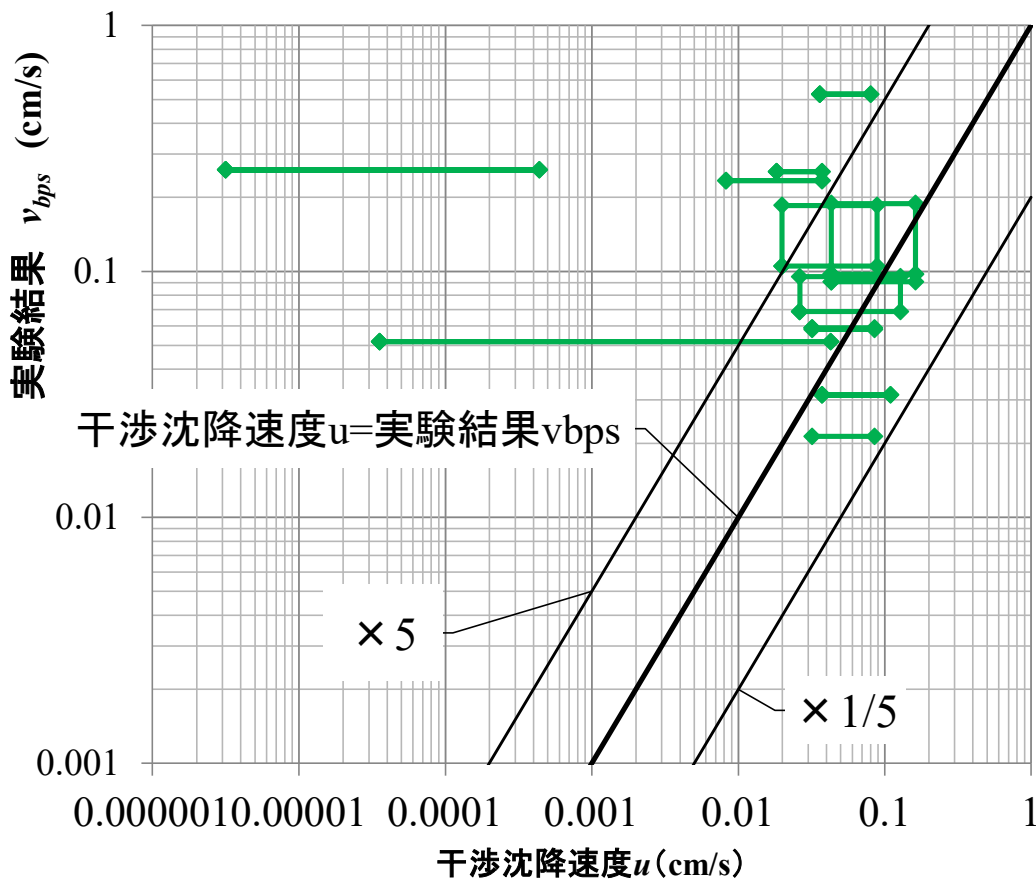
$$n = 4.4R_e^{-0.1} \quad 1 < R_e < 500 \quad (3-3)$$

$$n = 2.4 \quad 500 < R_e \quad (3-4)$$

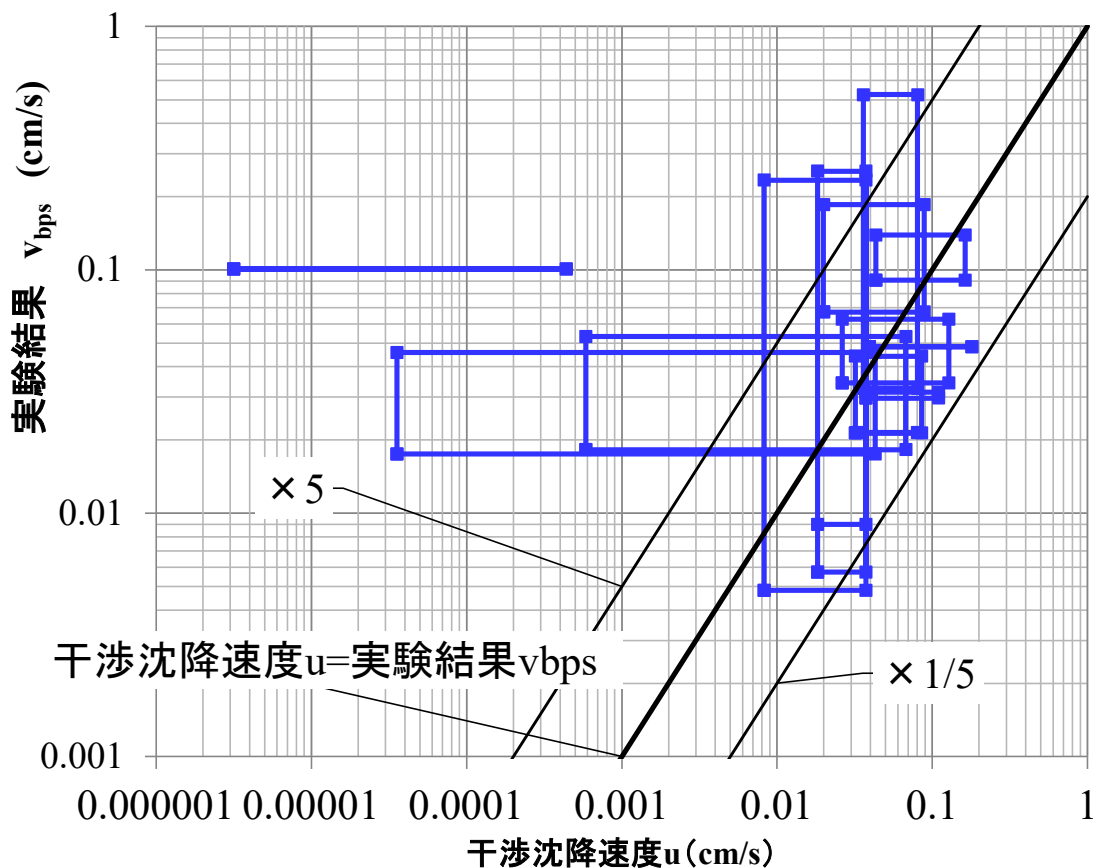
ここで, u : 干渉沈降速度, w_0 : 単粒子沈降速度, e : 空隙比, R_e : 砂粒子のReynolds数

干渉沈降速度 $u \times 1/5$ で、ほぼ見落とししなく評価可能

◆ 三木ら1996 砂層パイピング vbps
 — 干渉沈降速度 u =実験結果vbps

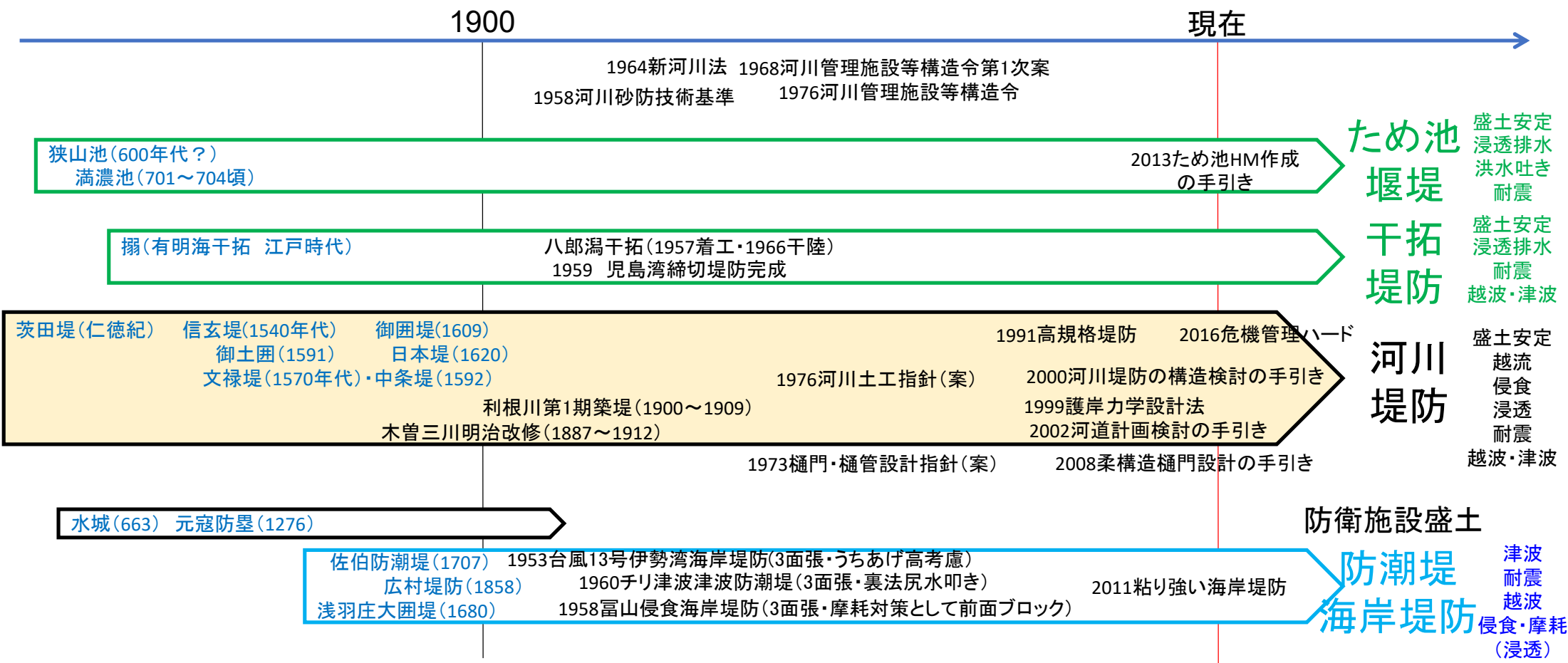


◆ 三木ら1996 砂層噴砂状態 vbps
 — 干渉沈降速度 u =実験結果vbps



堤防(土工・構造中心)技術の変遷

土工技術開発牽引は軟弱地盤干拓堤防から河川堤防へ



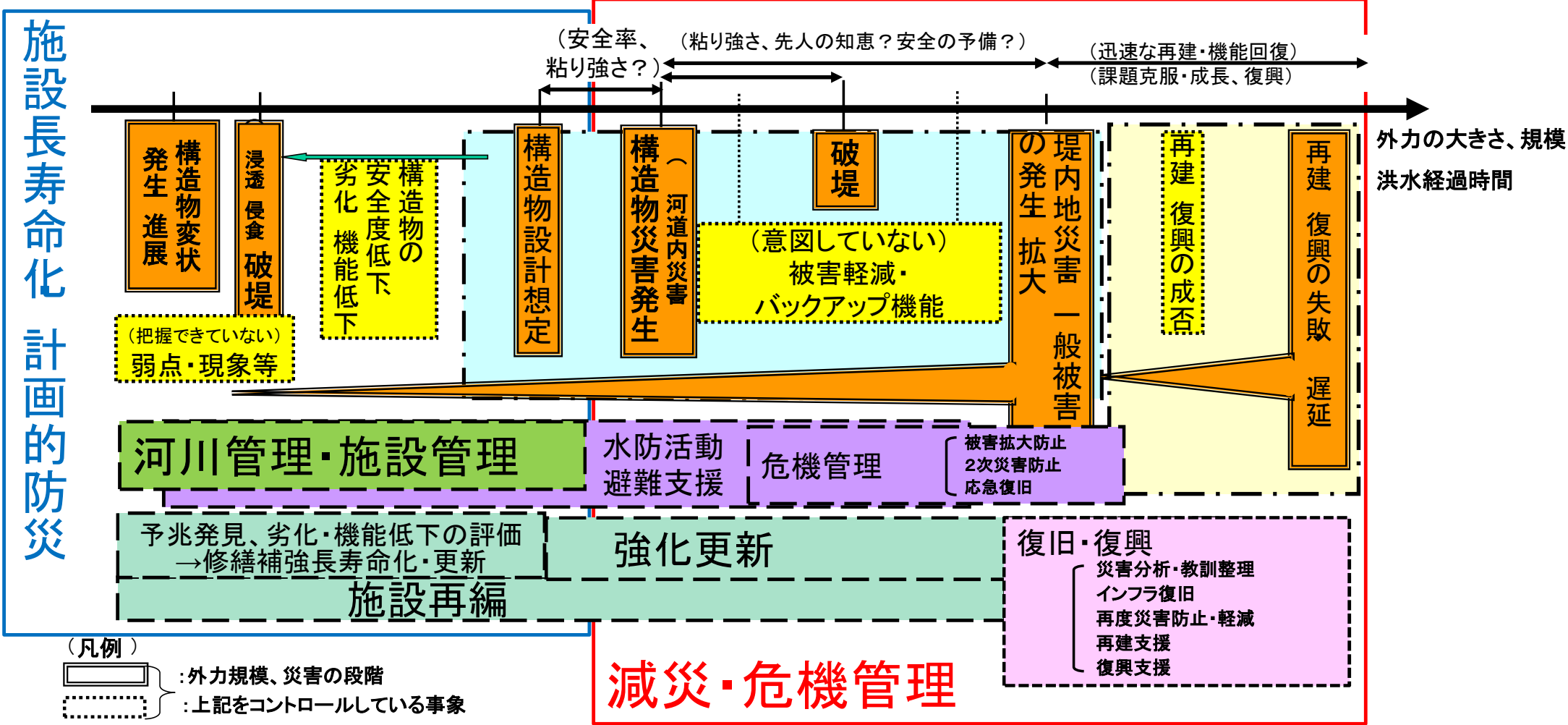
浸透

- 施工(土工と性能, 軟弱地盤の変形・経年劣化), 堤体浸透(浸潤面上昇), 浸透における降雨の影響, 奥に向かって巣穴を掘る動物損傷が劣化に与える影響の投稿が見られない.
- →これら分野は解決したという整理でよいのか? 調査研究が必要ない取るに足りない分野なのか?
- →R9-2は巣穴の影響がないと結論付けたと考えてよいのか? 浸透流解析+変形解析による補強・裏付けは必要ないのか?

浸透（樋門・樋管周辺）

- 樋門・樋管周辺浸透，施工（樋門・樋管の更新，施工上の課題・工夫，土工と性能），劣化・点検（ルーフィング・常時冠水している函体の空洞診断方法），堤内地水路部分のパイピング等の投稿がない。
- →これら分野は解決したという整理でよいのか？調査研究が必要ない取るに足りない分野なのか？
- →R9-2はR1T19では樋門・樋管周辺の変状はないと結論付けたと考えてよいのか？そもそも対象とした点検内容でパイピング変状・空洞発達・ルーフィングをモニタリングできているのか？
- 堤内地水路がパイピングしやすいという知見は得られているはずと思料するが，点検やモニタリングに反映されているのか？

構造物の変状から一般被害拡大までの洪水応答



河川構造物の洪水応答とは

- ・その他の外的作用
- ・取り巻く諸条件の変化

背景、前提

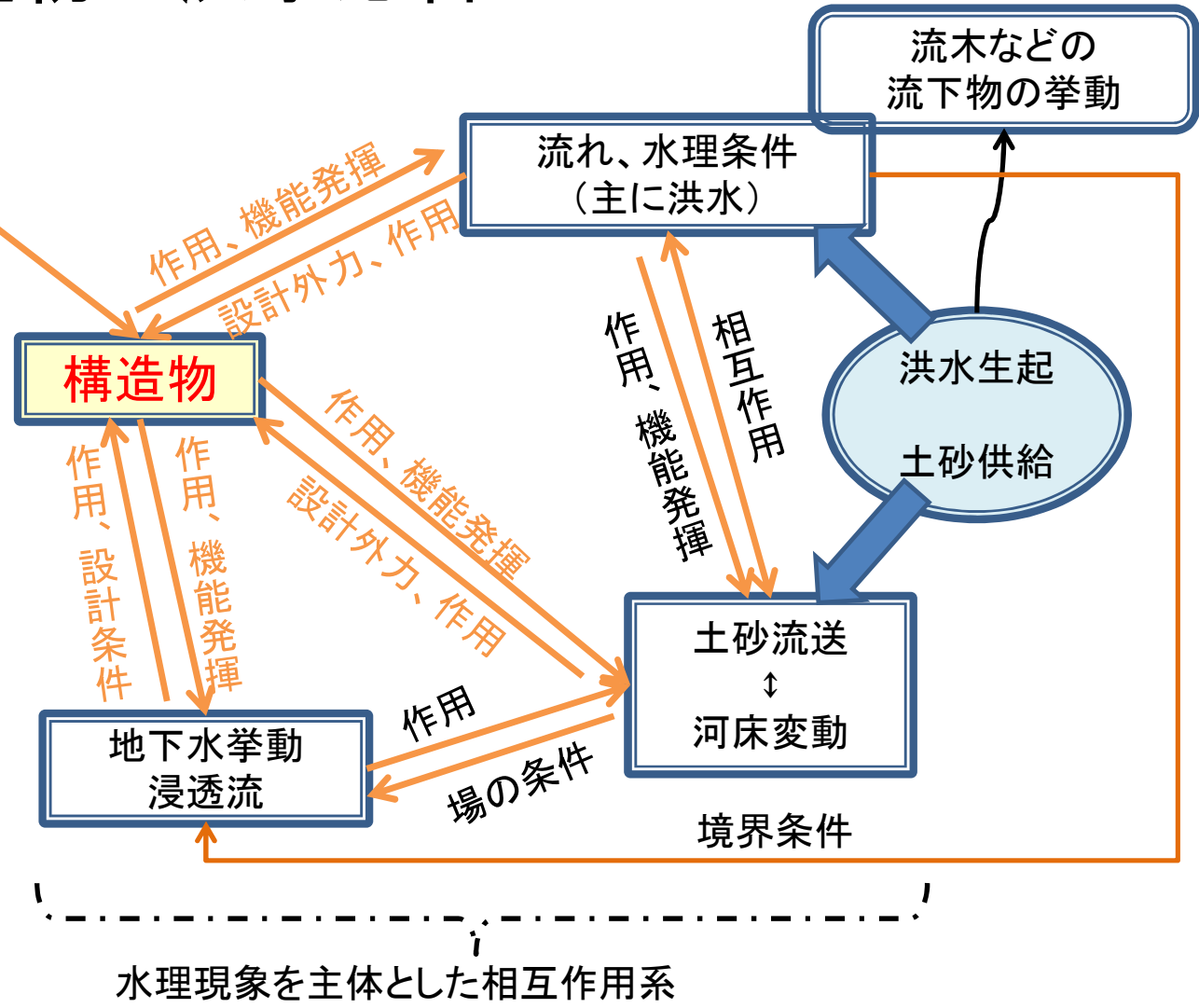
- ・ 河川インフラ整備における役割、位置づけ
- ・ **ニーズの新展開**
- ・ 設置実績と評価の蓄積
- ・ 施工性、投入可能コスト
- ・ 必要な寿命、メンテナンス容易性の確保

諸元・構造

- ・ 種類
- ・ 基本的な構造、諸元、形状
- ・ 使用する材料

設計上の要件

- ・ 所定の性能確保、機能発揮
- ・ これらの経時変化の制御性確保



河道で作用しうる外力と施設設計 洪水対応における施設管理者の役割

植生 土砂堆積
整備手順
流下能力管理
洪水調節
ダム 堰 機場操作

河道・ダム
管理者の
責任含む

・能力確保義務
・技術者良心としての工夫・貢献

河川管理として、
越流対策を行う
余地・理屈もある

設計対象外
破堤決壊氾濫前提で住民
自治体は避難等の措置とする
越流強化や氾濫流制御は施
設設計 管理の範囲外

<避難等支援措置>
・浸水想定区域
・ハザードマップ
・洪水予報
・水位周知
(・粘り強い構造)

住民 自治体 避難 水防
河道管理者 流下能力確保
堤防管理者責任無

技術者の良心として工夫・貢献

現行法制度上、越流
対策は「地域の自
衛」「水防」が主体

HWL
暫定堤防においては
天端高 - 余裕高

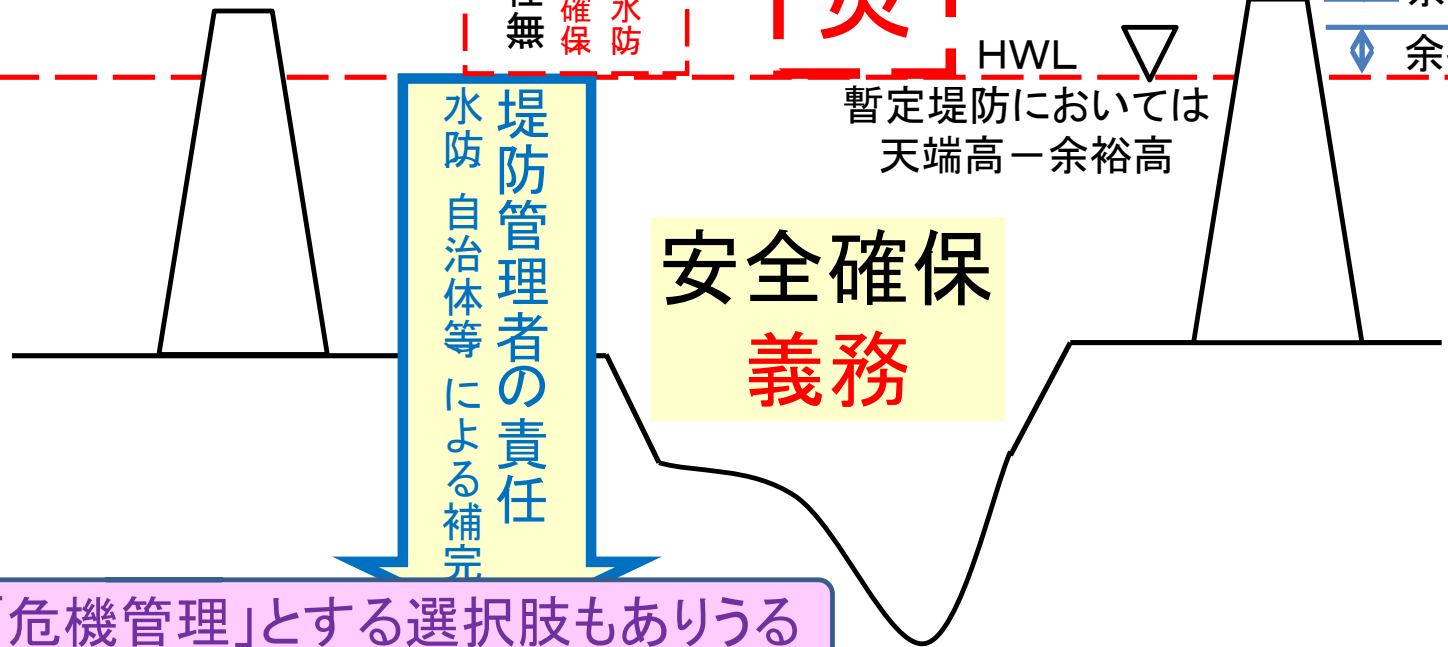
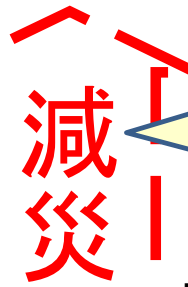
↓ 余盛高
◇ 余裕高

安全確保
義務

堤防管理者の責任
水防 自治体等による補完

安全となるよう設計 管理
ただし地盤弱点 堤体土層構
造等把握の不完全さ内包

河川管理、水防とは別に「危機管理」とする選択肢もありうる



27巻堤防関係採択内容

No.	タイトル:著者	流下能力 維持 点検 設計	施工		劣化		侵食			浸透					設計超過対応				
			土工	植生	植生	動物	侵食 直接	移動	流路	安全 確保 維持	雨 降 透	堤体 の 浸 透	外水 の 浸 透	パイ ピ ン グ	水 路 影 響	越 流	侵 食	浸 透	貯 留 効 果
①	堤防破堤リスクや内水氾濫を考慮したリアルタイム浸水把握・浸水予測システムの構築																		○
②	霞堤が形成する堤内遊水地の洪水調節機能に関する基礎的検討																		○
③	UAV 写真測量計測精度に着目した中小河川堤防高把握手法の開発	○																	
	三次元点群データとAIを活用した河川堤防の効率的な変状抽出に関する検討	○										○							
	被災経験と新技術を活用した堤防点検の高度化に向けた検討	○																	
	植物成長調整剤・除草剤と刈取を組み合わせた堤防植生管理手法の効果検証と本格適用に向けた課題分析	○		○	○														
	霞堤の治水機能の評価方法および流域治水計画における位置付けに関する一考察																		○
	令和2年7月球磨川豪雨における洪水流と氾濫流の一体解析による人吉市街地と狭隘区間の集落の被害分析																		○
④	乱れエネルギーを用いた河岸侵食危険確率の解析法とこれを用いた河川改修による流況改善の定量評価									○	△								
⑤	堤防侵食に対する維持管理・対策技術向上に向けた研究・技術開発の課題整理							○	○	○									
⑥	Fault Tree 図に基づく侵食・洗掘による堤防破壊の危険性評価の試行							△	△	○							△		
	砂州河川の危険箇所の複層的推定法の構築								○	△							△		
	安定河道横断面の概念を利用した低水護岸の被災リスク評価								△	○							△		
	UAV グリーンレーザ計測による河川構造物点検への適用検討									○									
⑦	遠心実験による堤体基礎地盤パイピングの寸法効果の研究												○						○
⑧	気候変動の影響を考慮した河川堤防の設計降雨量に関する解析的検討										○								○
⑨	三木ら(1996)大型実験結果の再整理から見出された砂粒子のパイピング応答状態												○						○
	令和元年台風19号による阿武隈川の漏水箇所における詳細調査及び被災要因分析												○						○
	裏法尻の間隙水圧伝播と漏水挙動からみた河川堤防における川表遮水工法の効果												○						○
	堤体基礎地盤のパイピング評価のための簡易な局所鉛直動水勾配の推定法												○						○
⑩	令和元年東日本台風による荒川第一調節池流入堤被覆工の被災メカニズム															○			
⑪	噛み合わせブロックによる被覆工の流入堤への適用性															○			
⑫	越水に対する堤防強化におけるシートの固定方法に関する検討															○			
⑬	難侵食層がヘッドカット進行および堤体欠損に及ぼす影響															○			
⑭	越水状況を撮影した画像から水面下の堤防の侵食状況を把握する手法の検討															○			
	既設光ファイバを活用する河川堤防変状検知基礎評価															○			
	内水・外水氾濫解析による山間地中小河川の浸水被害に対する支川の影響評価～令和元年東日本台風の永野川皆川城内地区を例として～															○			○

記号

堤防マネジメントのあるべき姿

目指す姿：水防関係者・堤内地住民等に信頼される堤防

→出水対応・現場対応は、机上の理論・仮定したシナリオの下にある計画ではなく、不確定事項もある中シナリオ通りに行くとは限らない真剣勝負をしている人たち

「要求性能」：HWL以下の洪水では、水防関係者・堤内地住民に不安を与える変状が起きない。変状が起きても水防工法・応急措置で（破堤しない・人的被害最小化する等）で対処できる。

⇒⇒現に出水時に起こった変状箇所は最優先に強化。類似箇所（次回出水で危険な箇所）があれば併せて強化。



「要求性能」：“破堤しないこと”に設定

→破堤しない≠変形・変状しない

⇒破堤さえしなければ応答・変形は最大限許容

⇒⇒計画的な「強化」は破堤につながるものに限定。残りの変状は災害復旧や維持修繕で対応。

→「許容できる変形」、「（破堤しないと評価される）変状」は、（研究者間には存在できても）現場関係者の信頼が得られない限り存在できない

⇒現に起こった噴砂、のり崩れ等変状箇所よりも、出水時に現地で何も起こらないのに机上の理屈上リスクが高いといわれる場所の強化が優先されるという話に理解が得られるか？

参考 洪水応答から見た「設計技術」のカバー範囲（私見）

