

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: 前田健一²⁾)

Levee Working Group of River Task Committee (Representative: Atsushi Hattori) and
Levee Failure Working Group 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)

Levee is one of the most important river structures. The levee failure and breach on the Yabe River in August 2012 warned us about the danger of seepage flows through 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 and Levee Failure WG were launched at 2013, corroborating two committees on Hydrosience 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, progressive failure, seepage flow, Hydrosience and Hydraulic Engineering, Geotechnical Engineering*

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, 堤防点検・管理に関する技術に関して, 下記のような3つの教訓・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ためと推定されている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まで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, その現象の進行プロセス・メカニズムが学術的

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メンバーから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、など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り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、浸透破壊の進行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) 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：特に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、メカニズムの理解が不十分で両者の発生条件が明確にはなっていない。
- ・ 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と考えられる事例があった。

- ・ 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りえ方が多い。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、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とその評価手法

- ・ 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⁾では、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。この例のような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、現場での継続的なモニタリングのほか、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

幅4m、高さ2m程度の堤防模型による基礎地盤のパイピング実験³⁾によると、限界流速、限界動水勾配には粒度分布によって差異が認められている。また、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。

また、堤体の土質材料・締め固めを系統的に変化させた浸透破壊実験により、細粒分が少なく締め固め度が低い

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ことが示されている。

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、限界動水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

土塊に作用す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のり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、基本となる見方の整理を試みた。ここでは、細部の厳密さを追求するのではなく、種々の形態に対して大掴みに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。

以下では、泥濘化の対象となる砂質土（φ材）を念頭

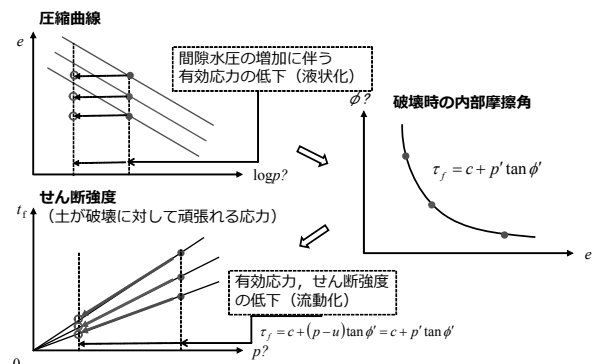


図-1 有効応力とせん断強度

に置いて議論を進める。

(1) 浸透層内の土の挙動のとりえ方

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(1)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。

$$\tau_f = c + (p - u) \tan \phi' = c + p' \tan \phi' \quad (1)$$

$$u = u_s + u_e$$

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。

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の空隙への詰まり（集積）が挙げられる。土塊の体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を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、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、すなわち有効応力は、ダルシー則が適用できるような“遅い流れ”の場合、微少な土要素（図-2に示す中Scaleに相当）を構成する土粒子群に作用する流体力（静水圧成分による浮力と浸透流による抗力）と以

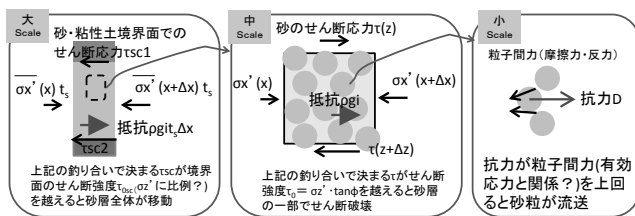


図-2 難浸透層に挟まれた砂層内の浸透流と力のつり合い

下に示す関係がある。地表面から深さ z における間隙水圧は、土要素に作用する浮力と抗力の鉛直方向成分を地表から深さ z まで積分した値と等しい。この値は、浮力分は静水圧と、また抗力分は水圧の静水圧からの差分である非静水圧成分と等しい。水平な地表面を有する地盤内に鉛直方向の浸透流が生じている場合、すなわち土要素に作用するせん断応力がゼロであり、かつ水平方向の応力は打ち消し合うため、鉛直方向の応力分布にのみ着目すればよい場合、上記の非静水圧成分を過剰間隙水圧として(1)式に与えて有効応力の鉛直方向成分を算定することができる。さらに水平方向にも流速成分を有する浸透流の場合に拡張すると、土要素に作用する水平方向の応力成分は、浸透流による抗力の水平方向成分を受けるため、必ずしも打ち消されない(図-2参照)。また土要素に作用する鉛直・水平方向の応力が空間的に分布を有する場合、せん断応力も一般的には発生しうるのである。したがって、土要素に作用する応力・せん断応力と浮力・抗力の釣り合い式から、有効応力(鉛直・水平成分とも)を算定することとなる。

飽和した基礎基盤内の砂質土層の浸透破壊の場合(特に水平方向成分が卓越する浸透流が生じる場合)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。河川水位の変化などによって地盤内でも非定常な流れが生じており、それにより砂が流送されている孔を想定した場合、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、下層に砂質土の2層構造の境界面に形成される孔では、ルーフィングのように空洞が維持され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孔壁からの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孔壁面から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、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きなり流送される「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を明確にすることは、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水みちがチャンネル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、⑦鉛直二次元から三次元への拡張(外水位の時空間分布、堤防の形状、土質構造分布)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、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、河床勾配が大きい箇所、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ことを3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、治水地形分類等の地盤条件、動水勾配等の外力条件、のり面勾配等の形状条件といった堤防に関する様々な基礎情報をもとに、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

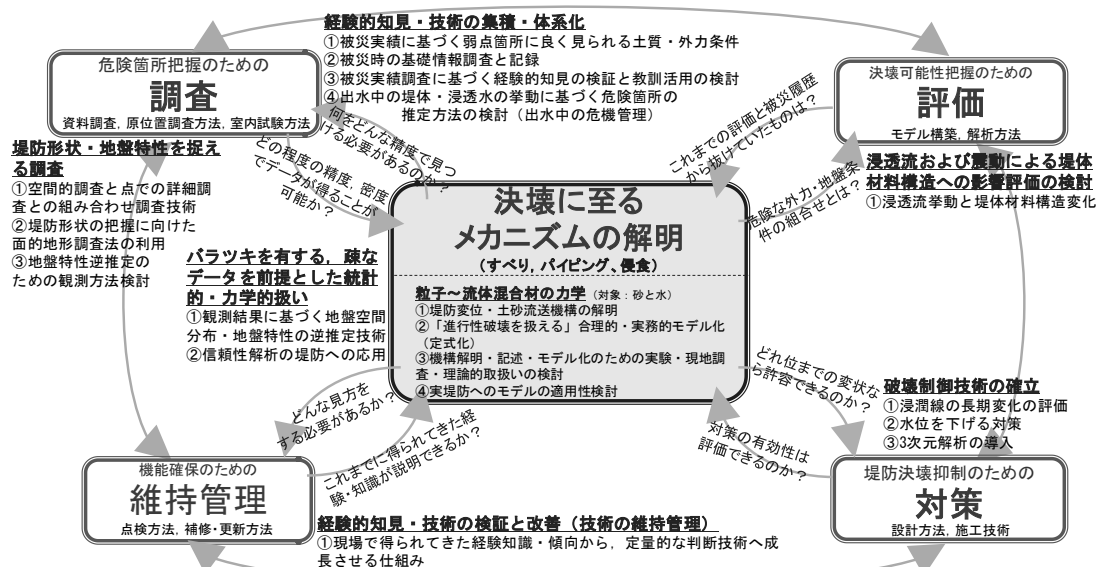


図-3 堤防破壊現象の解明とその対策に関するアカデミック・リサーチ・マップ

行える場の設置の3つを考えた。

まず、出水直後の被災・変状の記録であるが、記録の蓄積に留まらず、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関与することが重要である。

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、目視では探知できない被覆土層の小さな盤ぶくれをレーザースキャナ等により直接測定して捉えるなどの新たな技術開発が考えられる。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に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/saisyuhoukokusyo.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よ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パイピングについて、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)