

# 基礎地盤構造に起因する河川堤防浸透破壊の研究動向

笹岡信吾・福島雅紀・諏訪義雄

## 1. はじめに

洪水時の堤防決壊は、川の水が堤防天端を越えて起きる“越水”によるものと、川の水が堤防天端より低い状態でも起きる“浸透”や“侵食”によるものに大別される。近年では2015年9月の北関東の鬼怒川、2016年8月の北海道の空知川及び岩手県の小本川における被災が記憶に新しいが、これらは主に“越水”による堤防決壊である。一方、浸透に伴う噴砂や法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も発生している。2012年7月の九州北部の矢部川のように“浸透”によって決壊に至った事例もある。しかしながら現状では、堤防決壊に至るような大規模かつ進行的な浸透破壊の発生や堤防変形を定量的に評価できる解析技術は十分に確立されておらず、またその進行メカニズムが不明であるため、安全度向上にむけた課題となっている。

国土技術政策総合研究所（以下「国総研」という。）では、河川砂防技術研究開発公募の制度により産学の持つ先端的な技術を積極的に活用し、基礎地盤構造に起因する河川堤防の浸透破壊に係わる技術政策課題の解決に取り組んでいる。2015年度より、基礎地盤構造に起因する河川堤防の浸透破壊における進行メカニズムの研究が本制度により実施中である。3か年計画で以下に示す2つの研究テーマにより、課題解決に向けた先進的な研究を進めるとともに国総研においても実物大スケールの実験により進行過程の確認やメカニズムの解明に向けた研究を進めている。本報では、下記に示すそれぞれ特徴的な2つの研究テーマ及び国総研における取り組み状況と明らかとなった知見等について報告する。

## 2. 各研究テーマについて

### 2.1 テーマ① パイピングに伴う堤防劣化を考慮した河川堤防評価技術の開発

テーマ①では、高い透水性基礎地盤を有する河川堤防において、浸透を原因とした堤防の変状から破

壊に至るメカニズムを解明することを目的とした研究が進められている（研究代表者：名城大学小高教授）。模型実験によって、基礎地盤下層に透水性の高い材料、基礎地盤上層に透水性の低い材料を用いる複層構造を有する基礎地盤において、浸透水圧による有効応力の低下や消失に伴ってせん断強度が低下して堤体川裏法先から崩壊が発生し、やがて大きな堤体すべりが発生することがあることを確認するなど、透水性基礎地盤に起因する堤体崩壊パターンの類型化を示した（図-1）。また、空気～水～土骨格連成の有限変形弾塑性FEM解析コードGEOASIAを用いて、模型実験の再現解析を行い、基礎地盤条件の違いにより堤防の浸透破壊の発生を合理的に再現できることを示した。また、模型実験で観察された高透水性基礎地盤に起因して堤体法尻から発生する進行的なすべり崩壊のシミュレーションを実施している（図-2）。現在、上記と合わせて模型実験等で得られた知見や現地堤防の高さや法勾配等、形状に関する情報や地盤調査結果を整理し、信頼性解析に取り込み、堤防の縦断的な弱部や対策

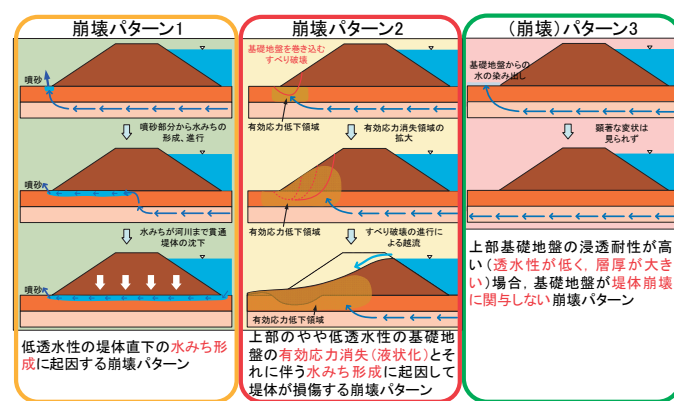


図-1 模型実験の結果から整理した崩壊パターン

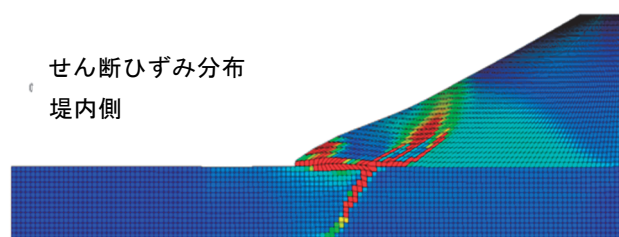


図-2 GEOASIAによるシミュレーション状況

優先箇所を選定に向けた検討を進めている。

## 2.2 テーマ② 透水性基礎地盤を有する河川堤防の進行性破壊を考慮した総合的安全性点検のための評価手法と破壊抑制に関する技術研究開発

テーマ②では、堤防崩壊メカニズムの把握や危険度評価解析手法についての研究が主に進められている(研究代表者：名古屋工業大学 前田教授)。図-3に示すように、堤体下の透水性基礎地盤が基礎地盤上層に透水性の低い材料、基礎地盤下層に透水性の高い材料を用いる複層構造の場合、単層構造と比べて複層構造では下層の圧力水頭の減衰が単層構造と比べ小さく、堤内側まで高い圧力が維持されていることがわかる。複層構造が単層構造と比べ、堤内の広い範囲で噴砂が発生しやすい条件であることを実験や浸透流解析を用いて明らかにした。この複層構造に着目し、基礎地盤の層構造・層厚比別にパイピングの進行度(堤内側から堤外側への距離に対するパイピングの発生に伴う堤体と基礎地盤の境界付近に形成される空洞が発達した距離の割合)と平均動水勾配の関係を整理し、パイピングに対して危険な箇所を簡単な指標で分類できる可能性を示した(図-4)。また、堤内地盤高の高低差により三次元的な集水による流れの局所化でパイピングが発生しやすいことを確認するなど、三次元的な検討を進めている。

テーマ①、②では、模型実験により、浸透破壊の進行度合いと平均動水勾配、透水性基礎地盤の土層パターンとの関係を明らかにするなど新たな知見が得られており、浸透にともなう堤体の崩壊パターンの分類・整理や模型実験の再現などができるようになってきている。今後はメカニズムのさらなる解明や危険度評価解析法の開発、信頼性解析について検討が進められ、実務への適用が可能となることが期待される。

## 3. 国総研における取組み

国総研においても上記研究テーマ①～②の研究グループと連携し、模型実験と数値解析を組み合わせた検討により、透水性基礎地盤に起因する河川からの浸透を原因とした堤防決壊及び変状のメカニズム解明に向けた研究に取り組んでいる。2014年度は、堤防法尻部を抽出した模型を用いて、パイピングが生じやすい地盤条件・水位条件を整理した。2015年度は、パイピング発達時の堤防全体の挙動把握を目的に、縮小寸法で堤防全体をモデル化した模型実

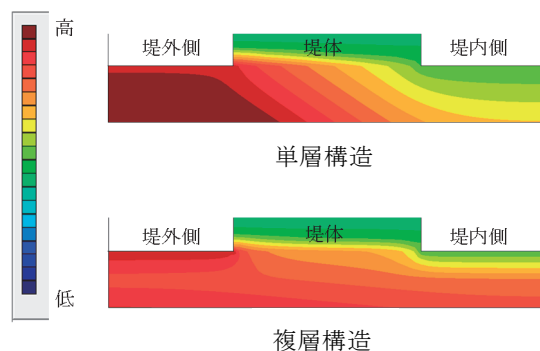


図-3 圧力水頭の鉛直断面分布(上：単層構造，下：複層構造)

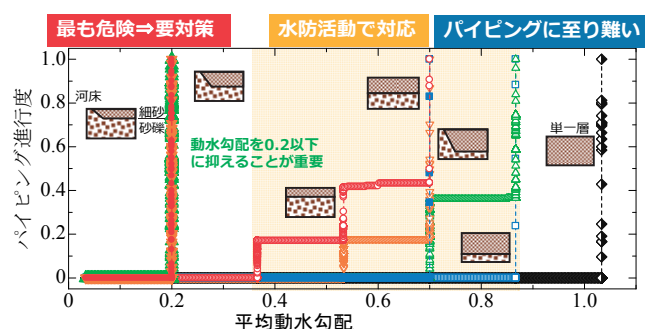


図-4 基礎層構造がパイピングの発達速度に及ぼす影響(図中の記号は、平均動水勾配の増加に伴うパイピング進行度の変化を基礎地盤の層構造・層厚比別に示している)

験を行い、パイピングによる堤防決壊の再現に成功している。2016年度からは、実物大模型を用いたパイピング再現実験に着手している(図-5)。実物大実験は、縮小実験模型の課題であるスケール効果を明らかにし、これまで蓄積した知見の妥当性を確認していくことを目的に進めている。

### 3.1 実物大模型実験

基礎地盤を上層と下層に分けた複層構造として、透水層の粒径及び厚さや川表側浸透面の条件を変えた実物大実験を4ケース実施した(図-6)。ケース1、2は、基礎地盤下層には同様の透水層を設置し、上層をケース1では透水性の低い材料、ケース2では不透水性の材料を用いて作成することで、上層の透水性の違いによる変状の進行状況の違いを確認した。ケース3、4においては複層構造の層厚の違いや行止まり地盤の有無等がパイピングによる噴砂、空洞化、堤体の崩壊といった変状連鎖にどのように影響するのか確認した。また、ケース1、2は基礎地盤における透水層の幅を0.3m、ケース3、4は透水層の幅を水路全幅とし、透水層の縦断方向の幅がパイピング発生に与える影響を確認した。

### 3.2 実物大実験結果

ケース2以外は、実験開始直後より基礎地盤から漏水が発生し、外水位の上昇とともに川裏法尻部では噴砂が発生した。その後、パイピングが発達して堤体下部の水みち（空洞）が発達したが、堤体法面の崩壊にとどまり、決壊にまで至らなかったケース4と基礎地盤の水みちが発達し決壊にまで至ったケース1、3があった。

決壊に至ったケース1、3では、川裏法尻部において堤体土が間隙水圧により持ち上がる様子や、基礎地盤上層において噴砂が発生して、基礎地盤上層と堤体との境界において砂粒子の移動が生じ、水みちが発達する様子を観察できた。なお、これらは堤体川裏法尻部の基礎地盤に設置したアクリル箱内にカメラを設置することで観察できた（図-7）。

図-8には実物大実験4ケースのパイピングにより形成された堤体下部の水みち進行状況を示した。水みちの進行状況は基礎地盤に配置した色砂の流出状況や模型内に配置した3軸成分の加速度及び水圧を計測できる小型モーションロガーのデータを根拠に作成した。ケース2以外は外水位上昇直後より基礎地盤から漏水が発生し、水位上昇とともに川裏法尻部では噴砂が発生した。その後、パイピングが発達して堤体下部に水みちが形成されたが、ケース4では堤体法面の崩壊にとどまり決壊にまで至らず、ケース1、3では基礎地盤の水みちが発達し決壊にまで至った。

### 3.3 変状過程の整理

各ケースにおいて確認できた変状過程について4つのフェーズに分類して整理した。変状のきっかけとなる堤体川裏法尻の崩壊、盤ぶくれ、漏水・噴砂といった現象をフェーズⅠ、水みちの進行をフェーズⅡ、堤体の変形と水みちの進行・停止の相互作用をフェーズⅢ、水みち内流れや越流水等の高流速による堤体侵食をフェーズⅣとすると、図-7のⅠ～Ⅳのように整理できる。どのケースも堤体亀裂の発生や盤ぶくれ、噴砂といった現象は変状の初期に発生するがその後の水みちの発達や堤体土の崩壊といった現象は基礎地盤や堤体土質の条件等によって発生の有無やその進行速度が異なると考えられる。

今後、水みちの進行や堤体土の崩壊に進展するのか、途中で変状が止まるのか、変状が進むのであればその速度はどのくらいかを定量的に評価する手法の開発が必要である。

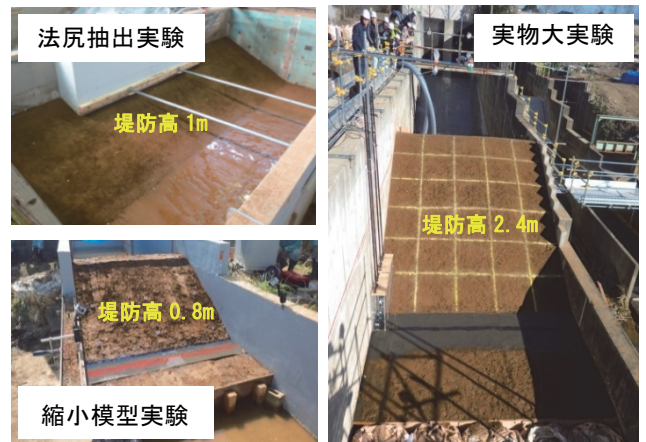


図-5 平成26年度～平成28年度実施の模型実験

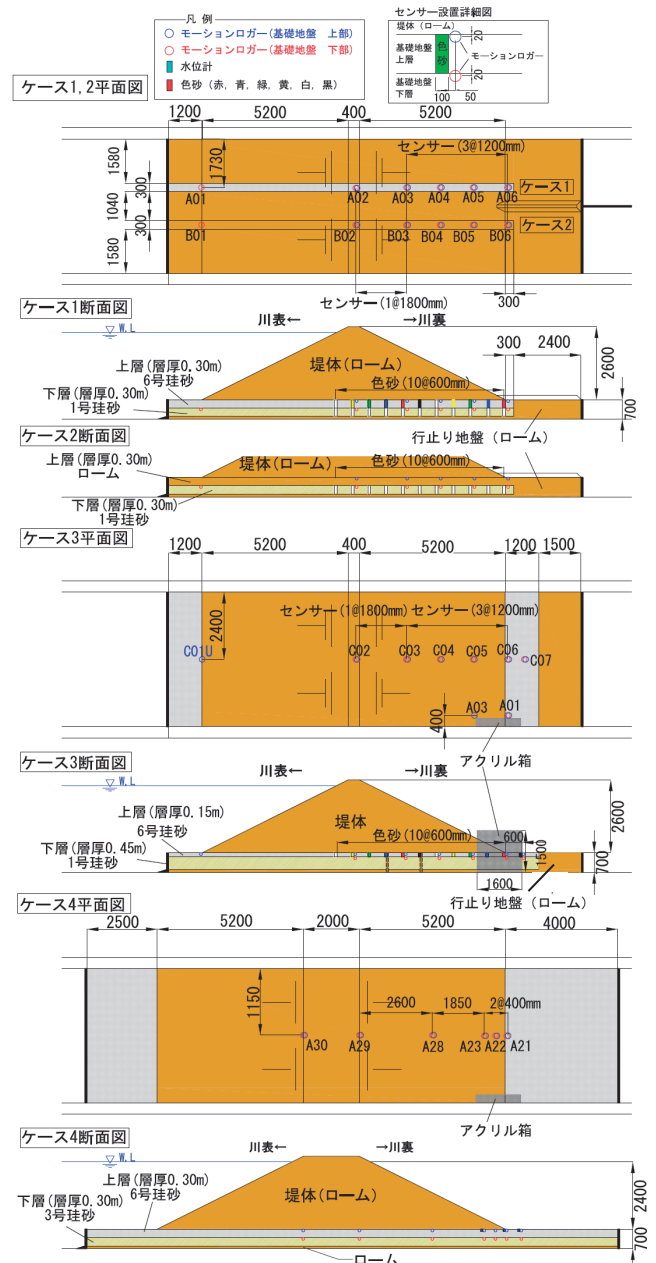


図-6 実物大実験模型断面図及び平面図

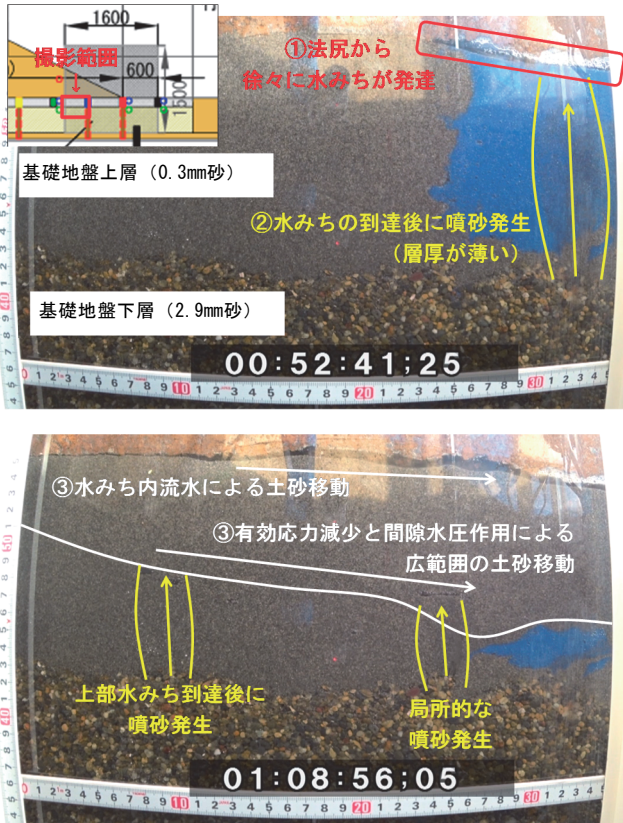


図-7 基礎地盤内における水みち発達状況（ケース3）

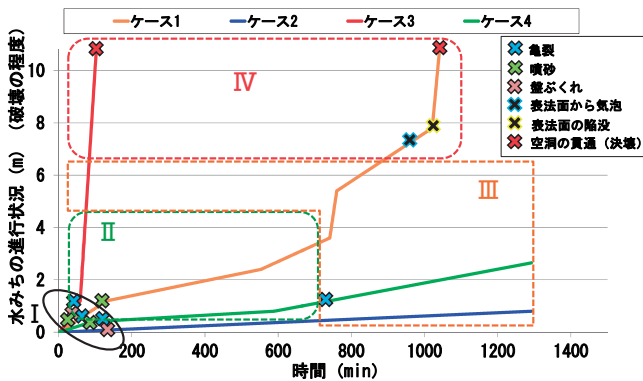


図-8 変状連鎖の進行状況の違い

#### 4. まとめ

これまでの検討により、パイピングが発達するメカニズムや堤体が崩壊するまでのパイピングの進行過程が明らかになってきた。その結果、パイピン

グ発達による堤防決壊の危険箇所を示すことが出来るようになると思われる。

パイピングによる水みちの発達、堤体の変形、決壊・破堤に至る過程には基礎地盤だけでなく堤体土質も関係すると考えられることから、さらに実験を実施するとともに、各研究グループとの連携を深め、定量的な評価手法を含めて堤防決壊メカニズムの解明につなげていきたい。各研究は今年度に最終年度を迎え、研究成果を取り纏める時期にさしかかっている。国総研においては各研究成果を統合し関係機関と調整の上、実務への適用を進める予定である。

#### 謝 辞

本研究を遂行するにあたり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における意見交換会に携わる関係者の方々より多くのご助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 小高猛司、李圭太、崔瑛、森智彦、森三史郎、林愛実：浸透に伴う基礎地盤の弱化に起因する堤防法すべり崩壊に関する考察、第5回河川堤防技術シンポジウム、2017.11
- 2) 吉川高広、野田利弘、内藤誠也、小高猛司、崔瑛：空気～水～土骨格連成有限変形シミュレーションによる模型堤防の浸透破壊メカニズムの考察、第4回河川堤防技術シンポジウム、2016.11
- 3) 櫛山総平、前田健一、齊藤啓、李兆卿、泉典洋：漏水・噴砂の動態に着目した河川堤防のパイピングの進行性に及ぼす地盤条件と水位条件、第4回河川堤防技術シンポジウム、2016.11
- 4) 西村柁哉、前田健一、櫛山総平、泉典洋、齊藤啓：異なる基礎地盤特性の堤防の噴砂動態・パイピング挙動と漏水対策型水防工法の効果、河川技術論文集、第23巻、2017.6
- 5) 笹岡信吾、上野俊幸、森啓年、中村賢人、福島雅紀、諏訪義雄：大型模型実験に基づく河川堤防におけるパイピング発達過程の考察、河川技術論文集、第23巻、2017.6

笹岡信吾



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室 研究官  
Shingo SASAOKA

福島雅紀



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室 主任研究官、博（工）  
Dr. Masaki FUKUSHIMA

諏訪義雄



国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究部河川研究室長  
Yoshio SUWA