

河川堤防基礎地盤の多様な浸透機構の解明に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令4～令6

担当チーム：地質チーム

研究担当者：品川俊介、矢島良紀、尾西恭亮、
吉田直人

【要旨】

基盤漏水の発生した堤防において開削等の現地調査を行い、調査結果に基づき堤防基礎地盤の多様な浸透・破壊現象の分類を行った。その結果、透水層の土質の違いにより、堤防損傷の危険性が異なることが示唆された。また、基盤漏水の発生における空気噴出の影響について、室内漏水試験を実施し影響を分析した。土層内部の空気は漏水を発生させる間隙圧を低下させ、漏水の発生を促進することがわかった。

キーワード：堤防基礎地盤、基盤漏水、浸透機構、地盤破壊

1. はじめに

平成24年に破堤を生じた矢部川をはじめ、北川、阿武隈川、江の川など、各地の河川堤防で基礎地盤からの浸透に伴う漏水被害が多発している。長大な延長を有する河川堤防の安全性を確保するためには、局所的な弱部をきめ細かく把握した上で、弱部の特性に応じた対策を選定し、実施する必要がある。

漏水に関してはこれまで、水位上昇に伴う局所動水勾配や浸透流速の増大による浸透破壊が指摘されてきたが、土木研究所と河川管理者の協働による災害調査の蓄積により、地盤条件の違いによる災害発生様式の違いや、地盤の間隙に存在する空気の噴出などの地盤の破壊過程が存在することが明らかになりつつある。

基盤漏水は破堤へつながる危険性もあり、対策が急務であるが、浸透機構が不明なままでの点検や対策は非効率となるほか効果が十分に得られないことも懸念される。そのため、基盤漏水のおそれがある箇所を効果的に抽出し、適切な対策を実施するために河川堤防基礎地盤の多様な浸透機構の解明が課題である。

そこで本研究では、河川堤防基礎地盤の多様な浸透現象を現地調査に基づき分類するとともに、室内実験を用いた模擬土層試験^{1,2)}による、空気を伴う浸透機構を解明する。

2. 現地調査等に基づく堤防基礎地盤の多様な浸透現象の把握と分類

2.1 浸透機構の現地調査

これまで土木研究所では、河川の水位上昇に伴う地盤漏水箇所において、多数の現地調査を実施してきた。

その一例として、令和4年9月に五ヶ瀬川右岸10kp付近で大規模な噴砂が発生した事例^{3,4)}の調査結果を示す。

被災域において、開削によるトレンチ調査、土層強度検査棒（以下、土検棒）、物理探査等を実施し、堤防基礎地盤の浸透現象の調査を行った。図-1に噴砂域と調査位置を示す。

堤防は旧河道付近に位置しており、物理探査により浸透経路の把握を行った（図-2）。高比抵抗域は砂質または砂礫層を示しており、堤体基礎地盤浅部の高透水層を経路とした基盤浸透であることがわかった³⁾。

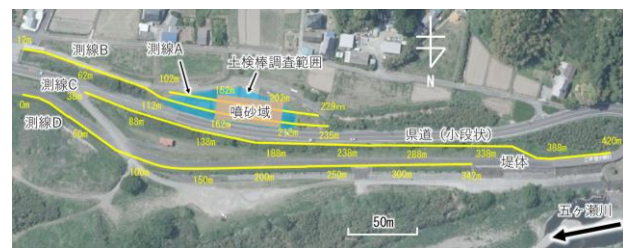


図-1 噴砂域と調査位置⁽³⁾を修正

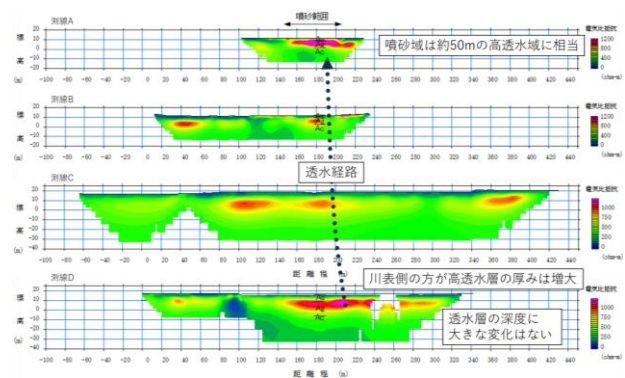


図-2 電気探査による透水層の分布⁽³⁾に加筆

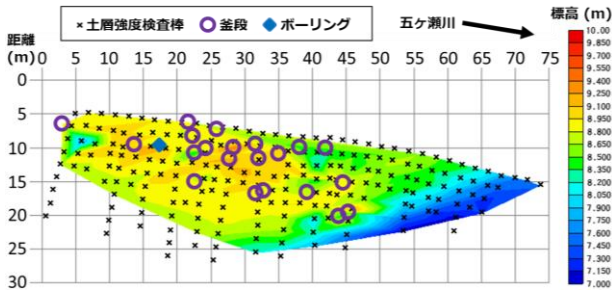


図-3 土層強度検査棒による貫入限界標高分布 (4) を修正)

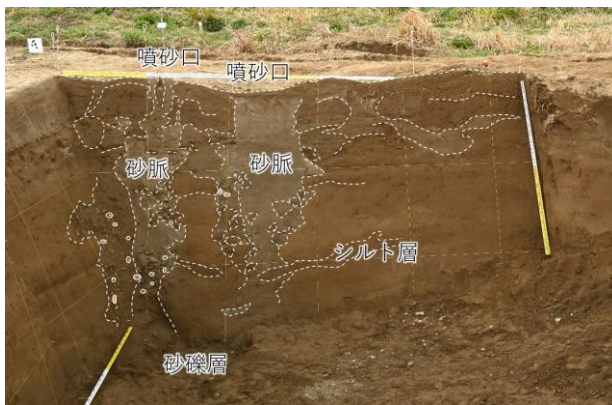


図-4 噴砂箇所における開削断面 (4) に加筆)

表-1 地盤漏水調査結果

河川 (年)	災害様式	透水層	備考
遠賀川 (S28)	漏水→堤体陥没→破堤	砂	文献 ⁵⁾
漁川 (S56)	破堤 (非越水)	軽石質砂	文献 ⁶⁾
川内川 (H18)	噴砂→のり尻陥没	砂主体	土研調査
矢部川 (H24)	漏水→堤体陥没→破堤	砂	文献 ⁷⁾ 土研調査
菊池川 (H24)	噴砂	砂	土研調査
北川 (H28~)	噴砂	礫主体	土研調査
常呂川 (H28)	噴砂	砂・砂礫	文献 ⁸⁾
肱川 (H30)	噴砂→のり尻陥没	砂・砂礫	文献
江の川 (H30,R2)	噴砂	砂・砂礫	文献 ⁹⁾ 土研調査
阿武隈川 (R1)	噴砂・のりすべり	砂・砂礫	土研調査
筑後川 (R2)	噴気	砂	土研調査
五ヶ瀬川 (R4)	噴砂・のりすべり	礫主体	土研調査

次に、図-3 に堤内地の噴砂域における土検棒の貫入限界標高分布を示す。地表面の標高はほぼ同一のため、貫入限界標高は、透水層である砂礫層の上面深度を表しており、のり尻または被覆土層厚の薄い地点で噴砂が生じていることがわかる⁴⁾。

図-4 に、噴砂箇所における開削断面例を示す。砂脈が砂礫層より噴砂口に向けて延びており、噴砂の起源が砂礫層中の砂であること、また、砂礫層上面は平滑

で、噴砂に伴う陥没が生じていないことがわかった⁴⁾。

2.2 地盤漏水調査結果に基づく漏水事例の分類

これまでの主な地盤漏水調査結果について、災害様式及び透水層の土質に注目した整理結果を表-1 に示す。

事例から、透水層が砂層の場合はのり尻に近い所で噴砂が発生するとともに、逐次破壊のモードに入り、引き続き破堤やのり尻の陥没などの重大な堤防損傷が発生している事例 (遠賀川⁵⁾、川内川、矢部川⁷⁾、肱川⁸⁾) があることがわかった。

また、表層の細粒質土直下に礫主体の砂礫層が存在する北川、五ヶ瀬川の事例では、土検棒の稠密サンディング調査により、表層の細粒質土の厚さが薄い地点で噴砂が発生している傾向があり、大規模な噴砂が繰り返し発生しているにもかかわらず、堤体の損傷はないか、軽微であることがわかった。北川、五ヶ瀬川⁴⁾の噴砂については基礎地盤のトレンチ壁面の観察結果から、礫層の間隙を充填している砂がその起源であり、また礫層の上面は平滑で、陥没が発生していないことがわかった。そしてこのような噴出状況においては堤体の損傷に至る可能性は低いと考えられる。

さらに、筑後川の事例では、高水時の現場での観察により、漏水ではなく間隙空気の上昇による地盤の破壊が発生した可能性があり、その後のトレンチ調査壁面の観察から、砂の噴出がないことが明らかになった。この事例から、地盤の破壊機構として、間隙空気の影響が推定された。

3. 実験的手法を用いた堤防基礎地盤の浸透機構の解明

3.1 空気の噴出による漏水発生への影響評価

3.1.1 小規模漏水試験の実施

未解明である空気の噴出による影響を評価するため、小規模漏水試験を実施した。図-5 に示す様に、被覆土層中央部のφ50mmの極小地点に対し、下部透水層より水や空気を供給する設計となっている。空気を噴出させる場合は、透水層上部の栓 A を開放して透水層に空気を充填する。透水層は4号東北珪砂、被覆土層は東北珪砂8~4号をそれぞれ5、5、10、10、40%、及び天草陶土を30%混合した砂に、水を15%含ませた。

3.1.2 漏水に至る過程の圧力変化と空気の影響

漏水に至る過程の土層間隙圧や供給圧を図-6 に示す。土層間隙圧力は被覆土層下面の間隙圧に、供給圧は透水層の間隙圧に相当する。空気噴出後では、噴出前よりも被覆土層と透水層の間隙圧力の差が大きくな

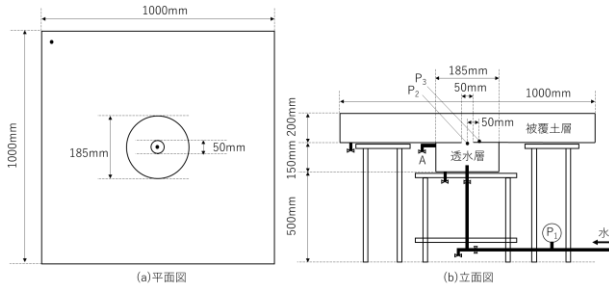


図-5 小規模土層試験装置の概要

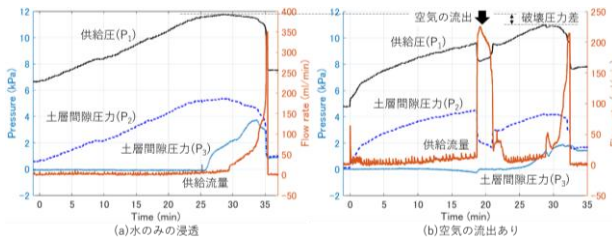


図-6 被覆土層下部に空気が存在する場合と存在しない場合の漏水発生過程における間隙圧力と流量の経過

る。すなわち、透水層に空気が存在していると、被覆土層により大きな間隙圧力を与え、漏水を促進させる。

次に、空気の噴出がある場合の漏水発生時の土層間隙圧力は、空気噴出時と同等の圧力を示している。このため、より小さい透水層の間隙圧力で漏水に至る。

3.1.3 盤ぶくれに伴う浸透経路の形成

土層断面（図-7）の観察により、浸透経路の形成について分析した。透水口上部における攪乱域の形成と、水平方向への浸透経路の発達が特徴的である。

始めに間隙圧力の上昇と共に浸潤域が被覆土層内部に拡大する。浸潤により地盤の変形特性が低下し、間隙圧力の上昇により盤ぶくれが生じる。盤ぶくれに伴い土層内部に水平亀裂が形成された場合や、土層の水平方向への透水性が元来高い場合に、間隙流体が移流可能な浸透経路が形成される。そして、盤ぶくれにより縁辺部に発生する亀裂を通じて漏水経路が形成される。一方で、透水口直上付近は、盤ぶくれにより地表面への浸透に必要な水頭が増大し、初期の浸透経路とならない。

また、PIV 解析による表層地盤の変形解析結果を図-8 に示す。盤ぶくれの生じた外縁部よりやや内側の地点が漏水点となっている。

3.2 複数の漏水点を伴う漏水現象

3.2.1 大規模漏水試験の実施

高透水の基礎地盤を透水経路とした堤内地の漏水で

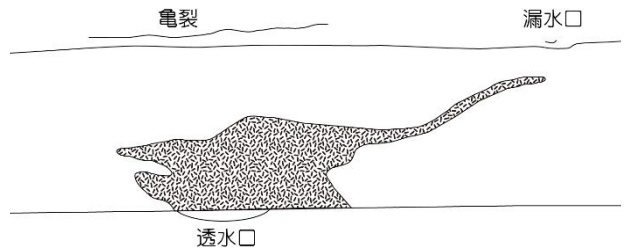


図-7 漏水発生箇所断面写真（上）と説明図（下）

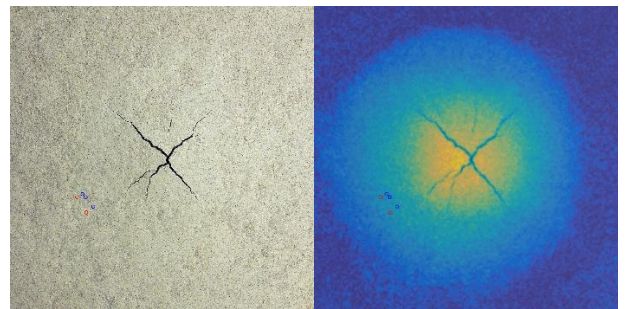


図-8 盤ぶくれと漏水点の関係（左：上面写真、右：PIV 解析結果）。左下の赤丸は初期漏水点、青丸は後期漏水点を示す。PIV 解析の暖色系は変動量が大きい領域であることを表す。

は、複数の漏水点から噴砂を生じる事例がある。そこで、縦 4.0m×横 3.5m×深さ 4.0m の土槽を使用し、大規模漏水試験を実施した²⁾。上位に被覆土層、下位に透水層を各 0.5m の厚さで作製した（図-9）。実験材料の透水層は茨城県下妻市の旧河道で掘削された砂礫、被覆土層は茨城県行方市の山砂にトククレを混ぜて細粒分含有率 35%程度になるように調整した混合土を用いた。実験開始条件を被覆土層は飽和状態、透水層は空気を含む不飽和の状態とし、塩ビ管内の水位を 20cm/10min で段階的に上昇させて透水層を被圧した。

3.2.2 複数の漏水点からの漏水の発生と圧力変化

図-10 に塩ビ管内の水位、及び透水層と被覆土層の間隙圧の推移を示す。①実験開始から②空気噴出開始まで地盤表面に変状はなく、②では空気の噴出が広範囲で発生し、空気の噴出箇所では被覆土層の間隙圧が急激に上昇した。次に、③空気噴出増加時には、被覆

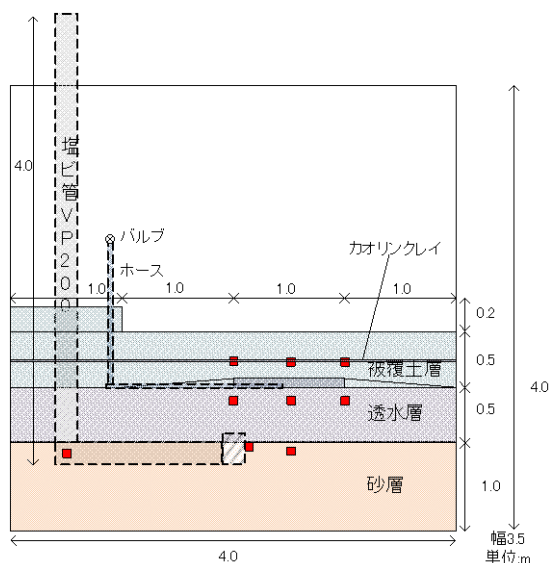


図-9 実験土層の模式図²⁾

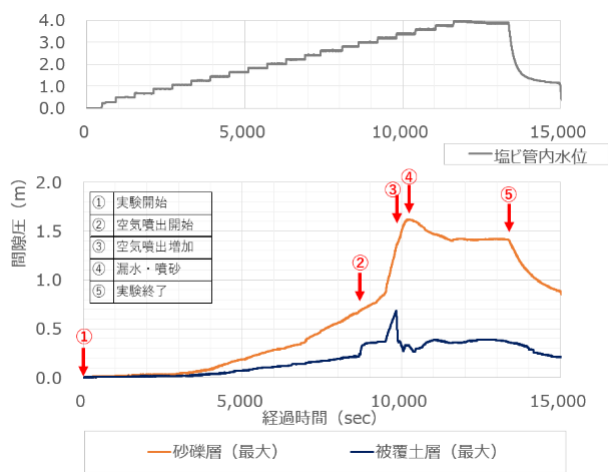
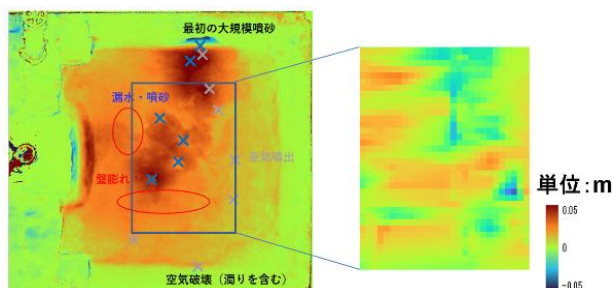


図-10 塩ビ管内水位と土層間隙圧の推移²⁾



(a) 地表地盤高の変化 (b) 被覆土層の高さ

図-11 空気噴出及び漏水の発生点と地盤高の分布²⁾

土層の圧力水頭が大きく上昇した後、低下した。その後、空気噴出が縮小し、④漏水・噴砂が発生した。ここで、最初に漏水・噴砂が生じた地点は、空気が噴出した付近であった。噴砂の拡大が停止し⑤終了した。

実験前後の地盤高の変化と変状箇所を図-11 に示す。漏水・噴砂域の周辺は噴砂が堆積している箇所が多く地盤高が増加した。地表面端部の噴砂が堆積していない箇所も地盤高が増加しており、地盤全体の盤膨れの発生が推定される。

4. まとめ

- 1) 現地調査の結果、五ヶ瀬川右岸 10kp 付近の噴砂は、基礎地盤浅部の高透水層を経路とした基盤漏水であり、堤内地の被覆土層が薄い地点で漏水・噴砂が発生した事例であることがわかった。
- 2) 基盤漏水被災堤防における現地調査結果を整理した結果、透水層が砂質であると破堤等の大きな堤体損傷に及ぶ場合があり、礫質であると堤体の損傷は軽微であることが示唆される。
- 3) 土層内の間隙空気の関与により、これまで考えられていた破壊モデルより小さな水頭で地盤の破壊が生じることを確認した。

参考文献

- 1) 吉田直人、尾西恭亮、品川俊介：堤防基礎地盤中に生じる空気層の影響に関する浸透破壊実験、第 58 回地盤工学研究発表会、12-2-1-04、2p.、2023.7.
- 2) 吉田直人、尾西恭亮、品川俊介：堤防基礎地盤を想定した大型浸透破壊実験による空気の影響、第 59 回地盤工学研究発表会、23-10-2-01、2p.、2024.7.
- 3) 大石佑輔、尾西恭亮、鈴木望夢、吉田直人、品川俊介、石原雅規：浸透経路推定のための河川堤防基礎地盤の電気探査、第 58 回地盤工学研究発表会、11-11-3-06、2p.、2023.7.
- 4) 品川俊介、吉田直人、荒谷忠、小寺凌、清水豊：2022 年 9 月、五ヶ瀬川の地盤漏水に伴う噴砂・陥没のトレンチ調査、第 39 回研究発表会、九州応用地質学会、pp.31-36、2023.11.
- 5) 古賀雷四郎、内田一郎：遠賀川の堤防決壊及び漏水について、土と基礎、Vol.2、No.4、pp.4-7、1954.1.
- 6) 瀬川明久編著：河川堤防の漏水対策技術(第 2 版)、p.25、北海道河川防災研究センター、2003.6.
- 7) 矢部川堤防調査委員会：矢部川堤防調査委員会報告書、185p.、2013.3.
- 8) 常呂川堤防調査委員会：常呂川堤防調査委員会報告書、74p.、2017.3.
- 9) 佐古俊介ほか：平成 30 年 7 月西日本豪雨災害における江の川堤防被災、土木学会論文集 B1(水工学)、Vol.75、No.1、pp.279-290、2019.12.

A STUDY ON VARIOUS MECHANISMS OF SEEPAGE FLOW THROUGH RIVER LEVEE FOUNDATION

Research Period: FY2022-2024

Research Team: Geology Research Team, Geology and
Geotechnical Engineering Research Group

Author: SHINAGAWA Shunsuke

YAJIMA Yoshinori

ONISHI Kyosuke

YOSHIDA Naoto

Abstract: Field investigations, including open cuttings, were conducted around river levees where foundation leakage had occurred, and various seepage and failure phenomena of the levee foundation soil were classified based on the investigation results. The results suggest that the risk of levee damage differs depending on the soil type in the permeable layer. The influence of air blowout on the occurrence of foundation leakage was analyzed by conducting laboratory leakage tests. It was found that air inside the soil layer reduces the pore pressure that causes leaks, and promotes the occurrence of leaks.

Keywords: River levee foundation, Foundation leakage, Seepage mechanism, Ground failure