

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

①研究代表者		氏 名（ふりがな）	所 属	役 職	
		前田健一 （まえだけんいち）	名古屋工業大学大学院	教授	
②研究 テーマ	名称	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			
	政策 領域	〔分野〕 河川技術分野	融合 技術	（リモートセンシング、非破壊 検査、認知行動学 等）	
		〔公募課題〕 (27-T)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			
③研究経費 （単位：万円）		平成 年度	平成 年度	平成 年度	総 合 計
※端数切り捨て。		956.1	961.7	1,065.6	2,983.4
④研究者氏名 （研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。）					
氏 名		所属・役職（※平成 年3月31日現在）			
岡村 未対		愛媛大学大学院・教授			
泉 典洋		北海道大学・教授			
渦岡 良介		京都大学大学院・教授			
高橋 章浩		東京工業大学大学院・教授			
新清 晃		応用地質株式会社・流域・水資源事業部・副事業部長			
⑤研究の目的・目標 （申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。）					
想定外力と河川堤防の特性を一体に考えた総合的視点の下で、堤防決壊の危険性の高い弱点箇所の把握と水防・対策の合理化等に資するために、(1)河川堤防の作用力モデルの高度化、(2)漏水と変状の進行のメカニズム及び決壊条件の解明、(3)複合的変状の進行を考慮した解析法と実用的点検・照査法の開発、(4)変形把握による堤防の構造の同定と危険度評価手法の提案、(5)堤防決壊抑制のための対策の評価・提案を行う。 本成果によって、①河川堤防の強化における危険箇所把握調査の効率化、決壊危険度評価の高度化、効果的な機能確保のための維持管理や決壊抑制対策の促進化が期待される。②治水地形情報や点検結果、被災履歴も活用することで、堤防の構造や力学特性が不明であっても、堤防の内部の推定や法尻付近に変状が現れる数時間前には、危険箇所と破壊のシナリオの推定を可能にすることが期待される。③避難勧告発令に関する重点監視区間の設定や洪水時の情報提供の迅速化、充実化が図られるとともに、管理者・技術者に対して情報収集項目と目的が見える化することができる。④外力による堤防表面に現れる変形量のオーダーが明らかになることで、現場仕様の測定機器の技術開発の目標値を設定できる。さらに、変状が生じる数時間前に、発生する可能性の高い変形・破壊形態が特定できるので、月の輪工等の伝統的水防工法に加え、それ以外の工法の技術開発も促進される。⑤くわえて、超過洪水の危機管理対策における余裕高部分の利用可能性の検討の予測技術として利用できる。					

⑥研究成果

1. 研究の背景・目的

(1) 想定外力と河川堤防の特性を一体に考える必要性

平成24年7月に九州北部で発生した豪雨による矢部川堤防の決壊は、河川水が透水性基盤地盤に浸透し、濁った漏水の発生後、パイピングの進展が原因とされている。また、決壊には至らなかったものの漏水に起因する変状の事例や噴砂とともに裏法すべりが観察された複合的な被災事例もある。現状では、法面滑り破壊に対する安全率と局所動水勾配を用いたパイピングに対する安全率が、別々に検討されている。さらに、近年の激しい豪雨時には高水位の継続時間が長くなっており、外力特性と堤防の地盤特性の組み合わせによっては、複合変状、大規模な進行性破壊の危険性が増加すると考えられる。堤防の破壊抑制やねばり強い堤防としての機能確保を考えた維持管理を行うには、想定外力波形と堤防特性（堤体と基盤）を一体に考え、変状の発生だけでなく発展や進展速度の解明が重要である。これは、河川技術の革新に繋がる挑戦的かつ重要なテーマである。

(2) 発展性のある漏水管理と新たな評価手法の枠組みへの移行の必要性

透水性基礎地盤に起因する漏水情報から、重点監視区間の設定、洪水時の避難勧告発令等に関する情報提供を充実することが要求されている。しかし、河川堤防は、不均一性が極めて高く、堤体の局所的な弱部から三次元的に破堤に至るような特徴を有することから、少ないボーリング調査で危険箇所を抽出するのは困難である。また、現状では、巡視点検で変状を発見する以外に、変状発生前に危険箇所を検知する方法は無いといえる。

一方、地盤工学では、均一な盛土の降雨や高水による浸透・侵食・法面崩壊の予測について、飽和・不飽和の土の力学挙動の解明とモデル化の研究が進展し、予測精度も向上してきた。しかし、事前に堤体材料の力学情報の取得を前提とした現行のフレームだけでは、堤防の延長が膨大であることも踏まえると破堤危険箇所を詳細に抽出することは不可能といえる。ここで、新たな情報収集と評価の概念が必要となる。

最近、レーザー測定によるMMSや衛星技術等の急速な発展により、高密度・高精度のリアルタイム地表面変位情報を堤防全体について取得することが現実味を増している。そこで、治水地形分類図などの歴史的情報とリアルタイム測定データ、数値解析結果を組み合わせることで、新たな管理システムの開発と導入が可能となれば、維持管理技術の大きな革新・進化に繋がるといえる。重要かつ導入可能性の高い技術となることは確実である。

2. 研究成果3カ年の研究内容

本研究では、想定外力と河川堤防の特性を一体に考えた総合的視点の下で（図-1参照）、堤防決壊の危険性の高い弱点箇所の把握と水防・対策の合理化等に資するために、(1)河川堤防の作用力モデルの高度化、(2)漏水と変状の進行のメカニズム及び決壊条件の解明、(3)複合的変状の進行を考慮した解析法と実用的点検・照査法の開発、(4)変形把握による堤防の構造の同定と危険度評価手法の提案、(5)堤防決壊抑制のための対策の評価・提案を行う。

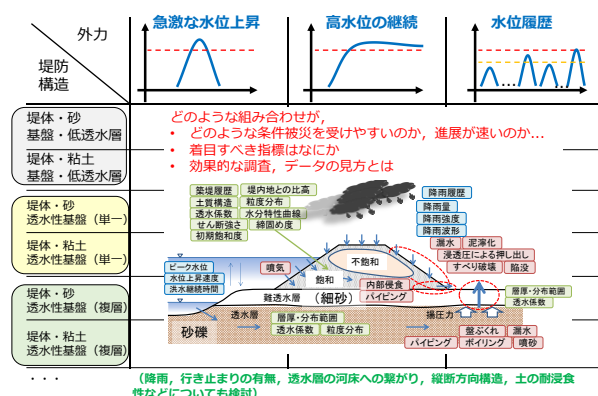


図-1 外力特性と堤防特性を一体に考えた被災の総合的検討

⑥研究成果（つづき）

3. 研究成果

(1) 河川堤防の作用力モデルの高度化

飽和定常浸透流解析を実施し、実験結果との比較から、パイピングのきっかけとなる状態までは再現可能であることが分かった。また、堤体の揚圧力は、パイプ流れの形成までは平均動水勾配にほぼ比例するが、パイプの形成後は、砂の流出と共に平均動水勾配増加に対する揚圧力の増加割合が小さくなることも示された。本研究では、噴砂孔をモデル化した解析方法を提案し、実測値をほぼ表現できることを確かめている。

(2) 漏水と変状進行のメカニズム及び決壊条件の解明

実験、検証された数値解析、現地調査から、高水位の継続、繰り返し作用によって、①緩みや空洞は堤内側から堤外側に伝播する（空洞貫通直前には堤外からも発展）②緩みは地層境界部・境界を結ぶ領域に強く発達する③緩みは出水後も地盤内に残存し、その後の高水の作用により緩みが再び発達することが分かった（図-2参照）。実堤防における調査でも漏水・噴砂によって堤体下にまでゆるみが生じていることが分かった（図-3参照）。

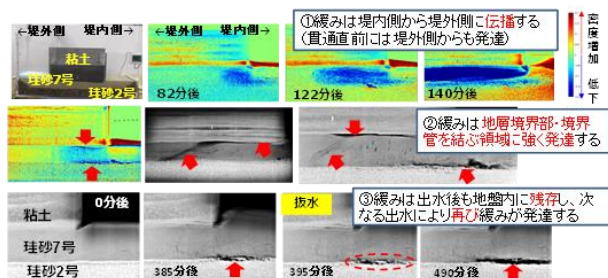


図-2 X線画像の差分による緩み領域の可視化

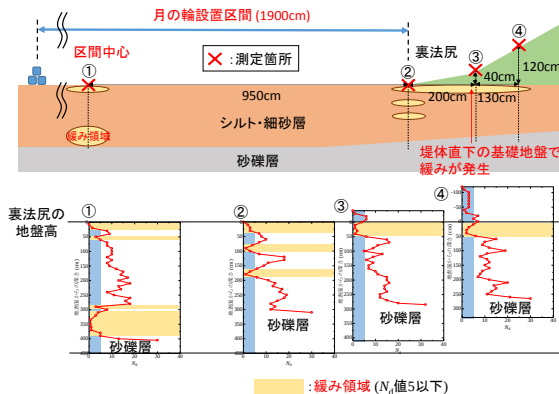


図-3 常呂川噴砂地点の堤内・堤体箇所貫入試験結果

また、繰り返し浸透を作用させる実験から、緩い法勾配と敷幅を確保し平均動水勾配を0.15以下にすれば、パイピングの発達を抑え、出水履歴を受けても堤防の安定性が維持可能という堤防の点検や整備において重要な結果が得られた。

模型実験、数値解析、理論・事例分析から単一の透水性基盤ではパイピングし難いこと、堤体に粘着性があり複層基盤（細砂層下に礫層層）で上層の細砂層が薄く（堤内地の不陸も含め）、堤内側の行き止まり境界・堤外側から下層の河川への露出を有し、支川の影響を受け易い場合、極めて危険性が高いことが明らかになった。また、「要事前対策箇所」、「決壊危険度の低い箇所」、「水防活動で破壊を抑制可能な箇所」を簡単な指標で分類できることが分かった。力学的考察に基づき、既存の調査技術で判断可能なパイピング破壊に進展しやすい地盤構造条件を見分ける力学に基づく簡易点検フローの提案（図-4）、噴砂動態の記録の利用の仕方などの被災記録の高度化の方法を示した。これらは、堤防の維持管理の効率化に繋がる。また、データの蓄積で更新・発展させる必要がある。

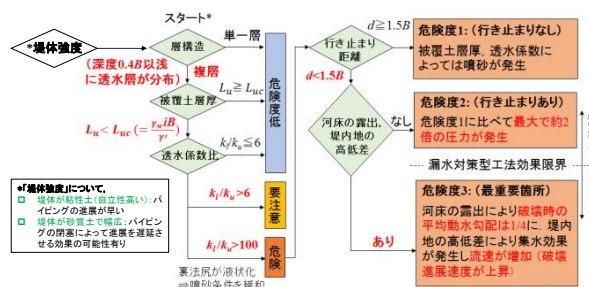
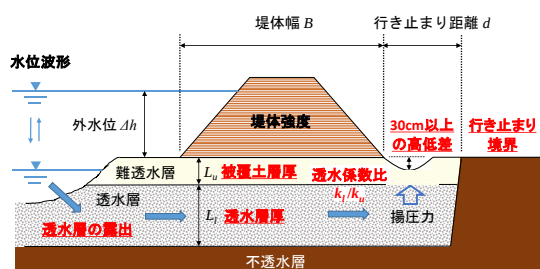


図-4 簡易で実用的な力学に基づくパイピング危険箇所点検フロー



パイピングの完全な力学的相似を成立させるためには、それぞれ①土粒子の比重、②Froude数、③土粒子の粒径と空間の代表長さの比の3つの無次元パラメータをすべて一致させる必要があることが導かれた。特に3つ目の無次元パラメータが重要となるのは、小スケールの応力テンソルが重要となる時であり、粒子の運動が比較的小さな空間に限られるパイピングの初期や土砂が動き始めて間もなくである。このパラメータは、局所的な土砂の運動を妨げる抵抗力の働きをするため、実物に比べると模型の抵抗力は相対的に大きくなり、実物より模型の方が、パイピングし難くなることを意味している。実験に工夫を要する点である。一方、粒子の運動が活発になり空隙率が十分大きくなると、粒径の長さスケールの影響は比較的小さくなることが分かった。

⑥研究成果（つづき）

(3) 複合的変状の進行を考慮した解析法と実用的点検・照査法の開発

降雨や高水位による大変形や破壊現象を再現可能な解析モデルを検討した．単に破壊パターンの分類をするのではなく，透水性基盤～堤体～外力を一体で整理し，破壊モードが連続的に変化し，どのような条件でどのような破壊形態を示しやすいのかを示すことが可能になってきた（図-5）．矢部川の決壊箇所，非決壊箇所の再現も行った．

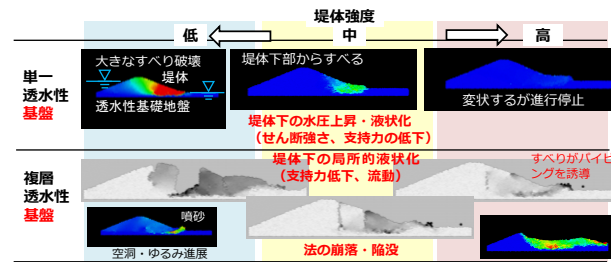


図-5 堤体－基礎地盤を一体と考え浸透破壊モードと発生条件を検討できる数値解析モデルの提案

(4) 変形把握による堤防の構造の同定と危険度評価手法の提案

堤体の地表面形状測定を積極的に利用することで，堤防特性および出水中・出水後の堤防の破壊危険箇所やその程度を評価する方法を提案した．対策の実施の判断や工法選定などの技術支援に期待される．点検におけるパイピング進展度の実用的点検法を提案する．高水による漏水や噴砂などの変状履歴がある堤防を対象とし，パイピングの進行度に応じた対策の緊急性を判断する材料となるものである．提案方法の流れを図-6に示す．噴砂に伴う堤内，堤体下，堤体の変状を常呂川，鬼怒川，矢部川，那賀川，後ろ側，重信川，宮崎北川などで調査した（子吉川は資料）．

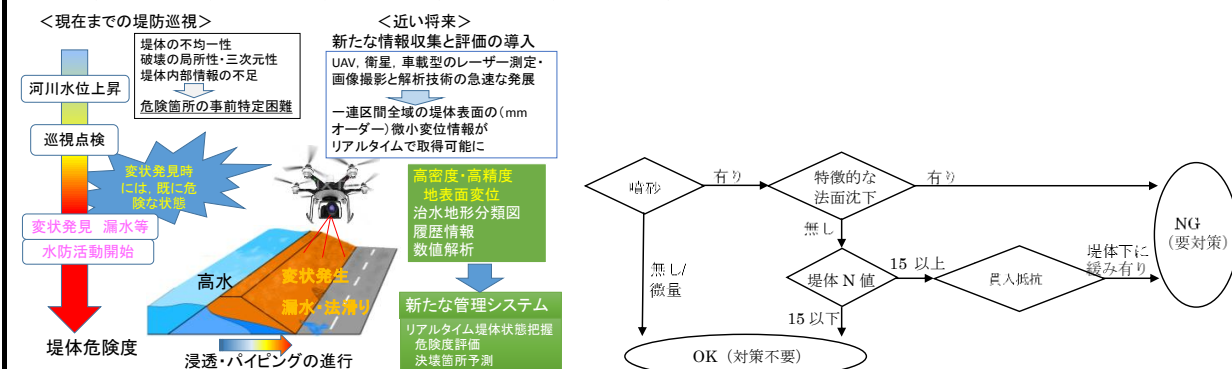


図-6 表面変位による堤防特性の推定及び危険箇所実用的点検フローの提案

(5) 堤防決壊抑制のための対策の評価・提案

釜段・月の輪工を用いた伝統的漏水対策型水防工法では噴砂による土砂流のモードと速度を低下させ緩みの進展を抑制する効果があることが分かった．しかし，複層で上層の細砂層が薄く下層の砂礫層が河床に露出している場合など基礎地盤条件によっては，対策工の効果が十分に発揮されないことが判明した（条件を図-4の点検フローに記載．基盤層の上層が浸透による液状化で対策工が沈下）．また，噴砂が法尻で発生すると堤体直下の土粒子が流出しパイピングを助長したり，噴砂を完全にふさぐことや噴砂単体に対策工を施すことで他の箇所で噴砂が発生・活性化したりする危険性も示された．そこで，「水防活動の重要三原則」，①噴砂孔を堤体に近づけない・移動させない②水圧を消散させながら漏水流速を下げる，③群発する噴砂は一度に対処する，を提案した．さらに，砂質土の法勾配がゆるい堤体では，小規模なすべりや崩壊によってパイピング孔を塞ぎ大きな変状に進展するのを抑制する破壊抑制の能力がある可能性が示された．今後の効率的な堤防の維持管理に有効な知見である．

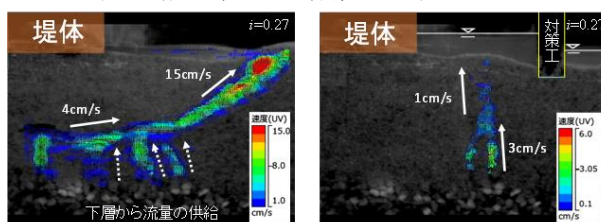


図-7 画像解析 PIV による対策工(月の輪工)設置前後の噴砂孔下部の噴砂速度
(a)左図： 月の輪工設置前，
(b)右図： 月の輪工設置後

⑥研究成果（つづき）

4. 今後の展望

- 1) 実堤防の被災について、実際にその過程をおさめた画像がない。これをとらえるような簡易なシステムの構築が必要と考えられる。
- 2) 実際の洪水時の被災状況は、堤防の横断面の特性だけでなく、検討箇所付近や支川からの基盤層からの地下水流動態、内水位、河川の狭窄部等の地形の影響と考えられる結果を得ている。これらの検討や簡易なモニタリングができれば、危険箇所の絞込みや危険度評価の高度化が期待される。現在、公開されている治水地形分類図だけでなく、河川工学と地盤工学が協力して、その地形が形成、土砂が堆積した過程を大まかに明らかにして判断基準に取り入れる方法の開発が必要である。
- 3) 堤内地の行止まり構造を把握するために開発した迅速で広範な調査が可能な電気探査手法（電極設置型と同様な結果を取得可能な牽引式）を噴砂が大量に発生した常呂川被災区間で検証した結果、行止まり構造を把握できた。今後も常呂川以外で噴砂が発生した河川での検証を進める必要がある。
- 4) パイピング現象の詳細なメカニズムが未だ解明されていないが、毎年の高水で多くの噴砂や漏水が発生しており、堤体の損傷度合いに応じて優先的に対策すべき箇所・方法を判別することは重要なである。本研究では、表面形状データと比較的簡便な貫入試験により堤体下部のパイピングの進展度を捉えることができ、これに関する点検フローも提案することができた。従来の堤内の漏水・噴砂の記録だけでなく、この調査実績を積み重ねることにより調査法としての適用性と限界が明らかになり、漏水対策の優先順位付けに資することが期待できる。
- 5) 遠心模型実験と実物に近い大型模型実験の間隙水圧の計測結果から、前者は後者の浸透現象を再現しているが、土粒子スケールでみると、かなり大きな土粒子を扱っていることになり、パイピングのように局所的に土粒子が移動する現象では現象の代表スケールに対する土粒子径の相対比の影響の考慮が必要であることが分かった。今回は、実物と同じ土質材料を用い、粘性流体を用いて実物の透水を再現したが、実物とは異なる細粒土（低透水係数）、間隙流体に水を用いるなどの工夫も考えられる。
- 6) 数値解析については、内部侵食モデルの材料パラメータや内部侵食を考慮した透水係数の設定が最大の課題である。簡易な室内試験方法を確立し、様々な材料に対するデータの蓄積が必要である。また、大型模型実験にみられるように堤防軸方向の変状は一樣ではないが、ここでは平面ひずみ条件下での二次元解析を実施した。堤防に限らず地盤の不均一性の評価とそのモデル化は地盤解析全般の課題であるが、特に内部侵食の問題においては弱部が致命的となることから、その評価はより重要である。
- 7) 漏水・噴砂を繰り返す箇所の特徴の把握を把握するために、模型実験で繰り返し浸透やそれに伴うパイプ進展過程を調べる実験において、水・砂の流出量や速度を計測できるようなシステムを組み上げ計測することが望まれる。

5. 河川等政策への質の向上への寄与

- 1) 緩い法勾配、敷幅を確保し平均動水勾配を0.15以下に抑えることで基盤構造に関わらずパイピングの発達を抑え、出水履歴を受けても堤防の安定性を保つことが可能であるという結果は、今後の河川堤防の維持管理と将来の堤防整備のあり方を繋げて考えることできる重要な情報と成り得る。
- 2) 透水性基盤の層構造（単一層、複層）、堤内側の行き止まり境界の有無、堤外側から複層構造の基礎地盤層の下層への流入境界の有無、堤内地の高低差によって、「要事前対策箇所」、「決壊危険度の低い箇所」、「水防活動で破壊を抑制できる箇所」といった堤防の危険度ランクと維持管理方法を簡単に分類できる可能性が示された。また、この分類は、従来のように高精度・高密度の探査や不撓乱試料採取などの手間と費用がかかる方法に頼らなくても、現行の調査法やその見方を工夫したり、日進月歩で技術的向上が見込まれるUAVや衛星画像技術を利用したりすることで、迅速かつ広域に可能である。これは、避難勧告発令に関する重点監視区間の設定や洪水時の情報提供の迅速化、充実化に貢献できると考えられる。重要水防箇所の設定にも貢献することができる。
- 3) 従来の噴砂情報は必ずしも十分には活かされてきたとは言えないが、噴砂動態と堤防構造との密接な関係の一端を明らかにした本研究成果を進展させ、蓄積データの再整理や今後記録されるデータを活かすことで、堤体－基礎地盤を一体として捉えた堤防の大まかな特性を把握することが可能になる。これは、効率的維持管理を行ううえでも、とても有益な情報であり、管理者・技術者に対して情報収集項目の選定やその目的を見える化することができる。
- 4) 噴砂孔の発生位置や間隔、発達条件などが明らかになることで、未だ設計が体系されていない比較的新しいパイピング対策工（例えばリリーフウェルなど）の設計方法の信頼性を向上することができる。さらに、堤防の緩みや空洞の発生・発展のメカニズムが分かることで、堤防の弱点部分や点検ポイントが整理され、適切な対策方法や箇所・範囲の選択、新たな技術開発の動機付けになる。
- 5) 伝統的水防工法の効果の一端が明らかになった。今後、研究が進展することで、効率的な水防活動の支援だけでなく、ハード整備とソフト対応の融合が促進され地域特性にあった水害対策が可能になる。
- 6) 堤体表面の変形把握による危険度評価に関しては、これまで目視点検に頼り見逃してきた可能性の高い、進展性の高いパイピングや基盤層の被圧による流動的滑り等についても、事前対策したり、高水中に変状の発達を捉え効率的な水防活動を支援したりすることが可能になる。

⑦研究成果の発表状況

(本研究の成果について、予定しているものも積極的に記入して下さい。(以下記入例))

- ・これまでに発表した代表的な論文
- ・著書(教科書、学会抄録、講演要旨は除く)
- ・国際会議、学会等における発表状況
- ・主要雑誌・新聞等への成果発表
- ・学術誌へ投稿中の論文(掲載が決定しているものに限る)
- ・究開発成果としての事業化、製品化などの普及状況
- ・企業とのタイアップ状況
- ・特許など、知的財産権の取得状況
- ・技術研究開発成果による受賞、表彰等)

【総説・解説】

- 1) 前田健一：数式のない土木の数値解析 地盤工学における粒子ベースの数値解析の可能性 ー地盤を科学し好學するためにー 土木学会誌(土木学会) 102(4) 44-45, 2017

【査読付き論文集】：奨励賞が1編

- 1) Ouyang, M. & Takahashi, A.: Optical quantification of suffusion in plane strain physical models, *Geotechnique Letters*, Vol. 5, No. 3, 118-122, 2015. (DOI: 10.1680/jgele.15.00038)
- 2) Ke, L. & Takahashi, A.: Drained monotonic responses of suffusional cohesionless soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 141, No. 8, 04015033, 2015. (DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001327)
- 3) Horikoshi, K. & Takahashi, A.: Suffusion-induced change in spatial distribution of fine fractions in embankment soils subjected to seepage flow, *Soils and Foundations*, Vol. 55, No. 5, 1293-1304, 2015 (DOI: 10.1016/j.sandf.2015.09.027)
- 4) 堀越一輝, 高橋章浩: 浸透流による盛土内の細粒土の移動に与える再堆積の影響, *地盤工学ジャーナル*, Vol. 10, No. 4, 473-488, 2015. (DOI: 10.3208/jgs.10.473)
- 5) 小柿響, 丸山貴広, 堀越一輝, 竹山智英, 高橋章浩: 透水性鋼矢板まわりの浸透流による砂質土の内部浸食, *土木学会論文集 Ser. A2*, Vol. 71, No. 2, I419-I427, 2015. (DOI: 10.2208/jscejam.71.I_419)
- 6) Ouyang, M. & Takahashi, A.: Influence of initial fines content on fabric of soils subjected to internal erosion, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 53, No. 2, 299-313, 2016. (DOI: 10.1139/cgj-2014-0344)
- 7) 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*, Vol.23, pp.381-386, 2017(6).
- 8) 齊藤啓, 前田健一: 二次元浸透流解析によるパイピング照査の高度化に向けた基礎研究, *河川技術論文集*, Vol.23, pp.375-380, 2017(6).
- 9) 岡村未対, 平尾優太郎, 前田健一: パイピングにより堤体表面に現れる沈下分布の特徴, *河川技術論文集*, Vol.23, pp.399-404, 2017(6).
- 10) 山口敦志, 前田健一, 松田達也, 高木健太郎: 表層流れに起因する地盤の流動および間隙水圧変化に関するDEM-CFD解析, *土木学会論文集B2 (海岸工学)*, Vol.73, No.2, I_517-I_522, 2017(11).
- 11) 松田達也, 前田健一, 山口敦志, 高木健太郎, 鶴ヶ崎和博, 宮本順司, 角田紘子: PIVによる水平流れに起因した土粒子・土粒子群の微視的な流動挙動解析, *土木学会論文集B2 (海岸工学)*, Vol.73, No.2, I_529-I_534, 2017(11).
- 12) 西村柁哉, 前田健一, 櫛山総平, 高辻理人, 泉典洋: 河川堤防のパイピング危険度の力学的簡易点検フローと漏水対策型水防工法の効果発揮条件, *河川技術論文集*, Vol.24, pp.613-618, 2018(6).
- 13) 岡村未対, 今村衛, 陣内尚子, 小野耕平, 山本卓男, 鎌田卓: 堤体表面沈下分布と貫入試験によるパイピング緩み領域の把握, *河川技術論文集*, Vol.24, pp.529-534, 2018(6).

【国際会議】

- 1) Horikoshi, K., Ke, L. & Takahashi, A.: Suffusion-induced change in spatial distribution of fine fraction in embankment subjected to steady and unsteady seepage flow, 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol. 2, No. 49, 1708-1713, 2015.
- 2) Ke, L., Ouyang, M., Horikoshi, K. & Takahashi, A.: Soil deformation due to suffusion and its consequences on undrained behavior under various confining pressures, 15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Japanese Geotechnical Society Special Publication, Vol. 2, No. 8, 368-373, 2015.
- 3) Koito, N., Horikoshi, K. & Takahashi, A.: Physical modelling of backward erosion piping in foundation beneath levee, Proceedings of the 8th International Conference on Scour and Erosion, 445-451, 2016.
- 4) Takahashi, A., Horikoshi, K. & Maruyama, T.: Physical modelling of backward erosion piping in levee foundation subjected to repeated flooding, Book of Abstracts for 25th Meeting European Working Group on Internal Erosion in Embankment Dams & their Foundations, Delft, Netherlands, 4-5, 2017.
- 5) Kusaka, H. & Takahashi, A.: Estimation of water level in road embankment by transient unsaturated seepage analysis, Proceedings of the 2nd Pan-American Conference on Unsaturated Soils, Dallas, Texas, US, 2017.

【国内発表・シンポジウム】

- 1) 西村柁哉, 前田健一, 櫛山総平, 高辻理人, 泉典洋: 透水性基礎地盤を有する河川堤防のパイピング条件に基づく簡易な点検フローの提案, 第5回河川堤防技術シンポジウム, 東京都新宿区, 土木学会講堂, pp.13-16, 2017.1.21.
- 2) 岡村未対, 平尾優太郎, 佐橋直也: パイピングによる堤体表面形状変化の特徴, 第4回河川堤防技術シンポジウム, 2016.11
- 3) 岡村未対, 陣内尚子, 新清晃: 重信川での噴砂・漏水箇所における高水前後の堤防表面形状の比較, 第5回河川堤防技術シンポジウム, 2017.11
- 4) 新清晃, 倉田大輔, 川原孝洋, 京野修, 小西千里: X線を用いたパイピング破壊に伴う緩み領域の進行と水位履歴の影響, 第5回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.5-8, 2017.
- 5) 西村柁哉, 前田健一, 櫛山総平: 浸透流の局所化に着目した河川堤防の基礎地盤の不安定メカニズム, 計算工学講演会論文集, Vol.22, さいたま市, ソニックシティー, 2017.05.31-06.02.
- 6) 宮本順司, 鶴ヶ崎和博, 岩本哲也, 中瀬仁, 松田達也, 前田健一: 遠心模型実験による腹付工を設置した防波堤基礎マウンドの粘り強さの確認, 第42回海洋開発シンポジウム, Vol.73, No.2, I_7-I_12, 仙台市, 仙台国際センター, 2017.06.26-27.
- 7) 櫛山総平, 前田健一, 李兆卿, 西村柁哉, 泉典洋, 齋藤啓: 河川堤防における漏水対策型水防工法の浸透破壊に対する効果, 第52回地盤工学研究発表会, pp945-946, 2017.07.12-14.
- 8) 西村柁哉, 前田健一, 櫛山総平, 李兆卿, 泉典洋, 齋藤啓: 三次元浸透流に着目した透水性基礎地盤を有する河川堤防の噴砂孔のモデル化, 第52回地盤工学研究発表会, 名古屋市, 名古屋国際会議場, pp947-948, 2017.07.12-14.
- 9) 山口敦志, 前田健一, 高木健太郎: 表層流れによる地盤応力変化の解析的考察の試み, 第52回地盤工学研究発表会, 名古屋市, 名古屋国際会議場, pp.887-888, 2017.07.12-14.
- 10) 高木健太郎, 前田健一, 山口敦志: 電気抵抗法を用いた種々の外力作用下の飽和地盤のゆるみ挙動把握の試み, 第52回地盤工学研究発表会, pp.1945-1946, 名古屋市, 名古屋国際会議場, 2017.07.12-14.
- 11) 柏木淳, 前田健一, 森河由紀弘, 内藤直人: 集中豪雨下の地盤内部の浸潤前線及び流路形成の挙動, 第52回地盤工学研究発表会, pp.1887-1888, 名古屋市, 名古屋国際会議場, 2017.07.12-14
- 12) 佐藤弘瑛, 前田健一, 田坂晃一, 中尾通孝: 繰り返し透水履歴を受ける粒状体の内部浸食と目詰まり挙動, 第52回地盤工学研究発表会, pp.1963-1964, 名古屋市, 名古屋国際会議場, 2017.07.12-14
- 13) 西村柁哉, 前田健一, 櫛山総平, 高辻理人, 泉典洋: 三次元浸透流の局所化に着目した異なる基礎地盤特性の堤防の噴砂動態・パイピング挙動, 第29回中部地盤工学シンポジウム, pp.5-10, 名古屋市, 名古屋大学ES館, 2017.08.02.
- 14) 西村柁哉, 前田健一, 櫛山総平: 異なる基礎地盤特性の堤防の噴砂動態・パイピング挙動, 平成29年度全国大会第72回年次学術講演会(土木学会), PP.199-200, 福岡市, 九州大学伊都キャンパス, 2017.09.11-13.
- 15) 山口敦志, 前田健一, 松田達也, 高木健太郎: 表層流れに起因する地盤の流動および間隙水圧変化に関するDEM-CFD解析, 第64回海岸工学講演会, Vol.73, No.2, I_517-I_522, 札幌市, TKP札幌駅カンファレンスセンター, 2017.10.25-27.
- 16) 松田達也, 前田健一, 山口敦志, 高木健太郎, 鶴ヶ崎和博, 宮本順司, 角田紘子: PIVによる水平流れに起因した土粒子・土粒子群の微視的な流動挙動解析, 第64回海岸工学講演会, Vol.73, No.2, I_529-I_534, 札幌市, TKP札幌駅カンファレンスセンター, 2017.10.25-27.
- 17) 堀越一輝, 高橋章浩: 浸透流による盛土内細粒分の下方向の移動に及ぼす要因の実験的検討, 第50回地盤工学研究発表会講演集, Vol. 50, 973-974, 2015.
- 18) Ouyang, M. & Takahashi, A.: Image-based quantification of size and shape of colored siliceous sand, 第50回地盤工学研究発表会講演集, Vol. 50, 471-472, 2015.
- 19) 丸山貴広, 小柿響, 堀越一輝, 高橋章浩: 透水性鋼矢板周りの浸透流による砂質土の内部侵食に関する実験的研究, 第50回地盤工学研究発表会講演集, Vol. 50, 981-982, 2015.
- 20) 小柿響, 丸山貴広, 堀越一輝, 高橋章浩: 透水性鋼矢板まわりの内部浸食進展に関する解析的研究, 第50回地盤工学研究発表会講演集, Vol. 50, 983-984, 2015.
- 21) 堀越一輝, 竹山智英, 高橋章浩: 浸透流に起因する盛土内の細粒分流出過程に関する数値解析, 土木学会第18回応用力学シンポジウム講演概要集, Vol. 18, 2015.
- 22) 小井戸菜海, 丸山貴広, 関栄, 堀越一輝, 高橋章浩: パイピングと堤防変形進行メカニズムに関する遠心模型実験, 第51回地盤工学研究発表会講演集, Vol. 51, 1089-1090, 2016.
- 23) 堀越一輝, 小井戸菜海, 関栄, 高橋章浩: 堤防の漏水と変状に及ぼす基盤透水層厚の影響に関する研究, 第51回地盤工学研究発表会講演集, Vol. 51, 1091-1092, 2016.
- 24) 瀧澤歩実, 堀越一輝, 高橋章浩: 堤防基礎地盤の不均質性がパイピング発生確率に与える影響に関する数値実験, 第14回地盤工学会関東支部発表会講演集, Paper ID: 防災3-6, 278-279, 2017.
- 25) 日下寛彦, 高橋章浩, 藤岡一頼: 非定常浸透流解析による盛土内水位変化の推定とその影響因子の比較検討, 第52回地盤工学研究発表会講演集, 857-858, 2017.
- 26) 藤本幹太, 堀越一輝, 高橋章浩: Hole Erosion Testを用いた2015年関東・東北豪雨で被災した鬼怒川堤防基礎地盤土の内部侵食進展速度に関する研究, 第52回地盤工学研究発表会講演集, 955-956, 2017.
- 27) 丸山貴広, 関栄, 堀越一輝, 高橋章浩: 繰り返し浸透流による堤防基礎地盤の内部侵食の進展に関する遠心模型

- 実験, 第52回地盤工学研究発表会講演集, 943-944, 2017.
- 28) 笠谷亮太, 岡村未対: 高水作用を受ける均質な砂質土堤防の裏法崩壊メカニズム, 第51回地盤工学研究発表会, 2016.7
 - 29) 平尾優太郎, 岡村未対: 堤体パイピングを模擬した遠心模型実験での表面沈下分布特性, 第51回地盤工学研究発表会, 2016.7
 - 30) 平尾優太郎, 岡村未対: 堤体パイピングが引き起こす地盤表面沈下, 土木学会四国支部技術研究発表会, 2016.5
 - 31) 平尾優太郎, 岡村未対: パイピングにより堤体表面に現れる沈下分布の基礎的実験, 地盤工学会四国支部技術研究発表会, 2016.11
 - 32) 笠谷亮太, 岡村未対: 高水作用を受ける河川堤防の裏法崩壊メカニズム, 土木学会四国支部技術研究発表会, 2017.5
 - 33) 佐橋直也, 岡村未対: パイピングが引き起こす堤防表面沈下分布の堤体土質による違い, 土木学会四国支部技術研究発表会, 2017.5
 - 34) 小坂佳平, 岡村未対: 基礎地盤の違いが堤防裏法面の浸透破壊に及ぼす影響, 土木学会四国支部技術研究発表会, 2017.5
 - 35) 岡村未対, 小坂佳平: 高水時の堤防裏法面の滑り領域と破堤危険度評価, 河川技術論文集, 第23巻, 2017.6
 - 36) 岡村未対, 平尾優太郎, 前田健一: パイピングにより堤体表面に現れる沈下分布の特徴, 河川技術論文集, 第23巻, 2017.6
 - 37) 田村元希, 岡村未対: 河川堤防の高水時パイピング破壊を模擬した遠心模型実験, 第52回地盤工学研究発表会, 2017.7
 - 38) 小坂佳平, 岡村未対: 高水の浸透による河川堤防裏法面の破壊領域, 第52回地盤工学研究発表会, 2017.7
 - 39) 岡村未対, 今村衛, 陣内尚子, 山本卓男, 鎌田卓: 堤体表面沈下分布と貫入試験によるパイピング緩み領域の把握, 河川技術論文集, 第24巻, 2018.6 (投稿中)
 - 40) 原口遼太, 岡村未対: 粘土質シルト堤防の高水時裏法面崩壊実験, 第53回地盤工学研究発表会, 2018.7 (投稿中)
 - 41) 東呂木喬, 田村元希, 岡村未対, 小野耕平: 高水時の堤防直下地盤に生じるゆるみ領域の進行と堤体強度の影響, 第53回地盤工学研究発表会, 2018.7 (投稿中)
 - 42) 今村衛, 岡村未対, 小野耕平: 数値標高モデルと貫入試験結果による堤防基礎地盤の緩み領域の推測, 第53回地盤工学研究発表会, 2018.7 (投稿中)
 - 43) 新子晃生, 柳振錫, 居上靖弘, 上野勝利, 渦岡良介: 透水性互層地盤における河川堤防の浸透破壊に関する遠心模型実験, 第52回地盤工学研究発表会, pp.957-958, 2017.
 - 44) 柳振錫, 新子晃生, 居上靖弘, 上野勝利, 渦岡良介: 透水性互層地盤における河川堤防の浸透破壊に関する三相系連成解析, 第52回地盤工学研究発表会, pp.959-960, 2017.
 - 45) 柳振錫, 上野勝利, 渦岡良介: 透水性互層地盤における河川堤防の浸透破壊に関する遠心模型実験および三相系連成解析, 地盤と防災・環境に関するシンポジウム, Vol.12, pp.66-71, 2017.

【投稿中】

- 1) 論文集に5編
- 2) Ryu, J. and Uzuoka, R.: Three-phase coupled analysis on seepage failure of river levee on permeable multi-layer ground, 9th International Conference on Scour and Erosion (9th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2018)), 2018. (submitted)
- 3) Maeda, K., Nishimura, M. and Takatsuji, M.: Micro - macro modelling of piping and internal erosion in river levee, (9th International Conference on Scour and Erosion (ICSE 2018)), 2018. (submitted)
- 4) Maeda, K., Nishimura, M. and Takatsuji, M.: Micro - macro modelling of piping progressive failure in river levee, (IS-Atlanta 2018 Geo-Mechanics from Micro to Macro in Research and Practice), 2018. (submitted)
- 5) 柳振錫, 上野勝利, 渦岡良介: 透水性基礎地盤を有する河川堤防の実大模型実験に対する内部侵食を考慮した数値解析, 第53回地盤工学研究発表会, 2018. (投稿中)

など.

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

【新聞】 複数回

【雑誌】 なし

【テレビ】

C B C

中国放送(RCC) 8月20日

TBS Nスタ 11月30日

【依頼講演・招待講演・基調講演】

名古屋市上下水道局総務部職員研修 2018年2月15日

土木学会応用力学委員会西部地区応用力学フォーラム 2017年12月22日

地盤工学会四国支部愛媛県研究会 河川堤防技術に関する講演会 2017年11月28日

ITASCA FLAC/DEM事例紹介セミナー2017 基調講演 2017年9月21日

愛知県モリコロ基金助成事業の活動・

名古屋市守山区瀬古学区防災安心まちづくり委員会 2017年09月10日

土木学会・水工学夏期研修会 講師 2017年8月31日

豪雨による土砂災害研究会・災害科学研究所 2017年6月21日

2017年度・河川技術に関するシンポジウム

OPS2:「堤防浸透破壊はどこまで解明できたか」 2017年6月21日

⑨表彰、受領歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

特になし。

⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や河川政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

- ・ 実堤防の被災について、実際にその過程をおさめた画像がない。これをとらえるような簡単なシステムの構築が必要と考えられる。また、今回の研究で、実際の洪水時の被災状況は、堤防の横断面の特性だけでなく、支川や狭窄部の影響とおもわれる結果がでている。これらの検討や簡易なモニタリングがあれば、危険箇所の絞込みや危険度評価の高度化が期待される。
- ・ 堤内地の行止まり構造を把握するため開発した電気探査手法（電極設置型、牽引式）を噴砂が大量に発生した常呂川被災区間で検証した。検証の結果、行止まり構造を把握できることを確認した。今後も常呂川以外で噴砂が発生した河川での検証を進める必要がある。
- ・ パイピング現象はその詳細なメカニズムがいまだ解明されていない中、毎年高水中に多くの噴砂や漏水が発生している。その中でも、堤体の損傷度合いによって優先的に対策すべき箇所を判別することは重要なことである。今年度行った研究の中で、表面形状データだけではなく比較的簡便な貫入試験によりパイピングの進展度を捉えることができた。これは当初予定していなかった実施項目であるが、進展度を直接計測する方法として有力であることがわかった。今後も調査実績を積み重ねることにより調査法としての適用性と限界が明らかになり、漏水対策の優先順位付けに資することが期待できる。
- ・ 遠心模型実験と大型模型実験の間隙水圧の計測結果から、遠心模型実験は大型模型実験の浸透流速を概ね再現していると思われる（大型模型実験と遠心模型実験のFroude数は同じ）が、土粒子スケールでみると40倍の大きさの土粒子を扱っていることになる。パイピングのように土

粒子が移動するような現象では、土粒子スケールの考慮が必要となる可能性がある。今回は実物と同じ材料を用い、間隙流体に粘性流体を用いて実物での透水係数を再現したが、実物とは異なる細粒土（透水係数1/40）を用い、間隙流体に水を用いることも考えられる。

数値解析について

- ✓ 内部侵食モデルの材料パラメータや内部侵食を考慮した透水係数の設定が最大の課題である。簡易な室内試験方法を確立し、様々な材料に対するデータの蓄積が必要である。
- ✓ 大型模型実験にみられるように堤防軸方向の変状は一樣ではないが、ここでは平面ひずみ条件下での二次元解析を実施した。堤防に限らず地盤の不均一性の評価とそのモデル化は地盤解析全般の課題であるが、特に内部侵食の問題においては弱部が致命的となることから、その評価はより重要である。

漏水・噴砂を繰り返す箇所の特徴の把握を把握するために、模型実験で繰り返し浸透やそれに伴うパイプ進展過程を調べる実験において、水-砂の流出量や速度を計測できるようなシステムを組み上げ計測を行うようにしたい。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

（本研究で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。）

緩い法勾配、敷幅を確保し平均動水勾配を0.20以下に抑えることで基盤構造に関わらずパイピングの発達を抑え、出水履歴を受けても堤防の安定性を保つことが可能である結果は、今後の河川堤防の維持管理と将来の堤防整備のあり方を繋げるて考えることできる重要な情報と成り得る。

透水性基盤の層構造（単一層、複層）、堤内側の行き止まり境界の有無、堤外側から複層構造の基礎地盤層の下層への流入境界の有無、堤内地の高低差によって、「要事前対策箇所」、「決壊危険度の低い箇所」、「水防活動で破壊を抑制できる箇所」といった堤防の危険度ランクと維持管理方法を簡単に分類できる可能性が示された。また、この分類は、従来のように高精度・高密度の探査や不攪乱試料採取などの手間と費用がかかる方法に頼らなくても、現行の調査法やその見方を工夫したり、日進月歩で技術的向上が見込まれるUAVや衛星画像技術を利用したりすることで、迅速かつ広域に可能である。これは、避難勧告発令に関する重点監視区間の設定や洪水時の情報提供の迅速化、充実に貢献できると考えられる。重要水防箇所の設定にも貢献することができる。

従来の噴砂情報は必ずしも十分には活かされてきたとは言えなかったが、噴砂動態と堤防構造との密接な関係を明らかにしようとする本研究成果に基づいて、蓄積データの再整理や今後記録されるデータを活かすことで、堤体-基礎地盤を一体として捉えた堤防の大まかな特性を把握することが可能になる。これは、効率的維持管理を行う上でも、とても有益な情報であり、管理者・技術者に対して情報収集項目の選定やその目的を見える化することができる。

噴砂孔の発生位置や間隔、発達条件などが明らかになることで、未だ設計が体系されていない比較的新しいパイピング対策工（例えばリリーフウェルなど）の設計方法の信頼性を向上することができる。さらに、堤防の緩みや空洞の発生・発展のメカニズムが分かることで、堤防の弱点部分や点検ポイントが整理され、適切な対策方法や箇所・範囲の選択、新たな技術開発の動機付けになる。

伝統的水防工法の効果の一端が明らかにした。今後更に研究が進展することで、効率的な水防活動の支援だけでなく、ハード整備とソフト対応の融合が促進され地域特性にあ

った水害対策が可能になる。

・ 堤体表面の変形把握による危険度評価に関しては、これまで目視点検に頼り見逃してきた可能性のある、少しずつ発達するパイピングや滑りなどの堤体不安定化を捉えて事前に対策することや、高水中にリアルタイムで変状の発達を捉え水防活動を実施する箇所の選択と集中をすることが可能になる。