

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
	音田 慎一郎 (おんだ しんいちろう)	京都大学 大学院工学研究科	准教授
②研究テーマ	名称	越流侵食に対する河川堤防性能評価手法の高度化に関する技術研究開発	
③研究経費 (単位: 万円) ※端数切り捨て。	令和5年度	令和6年度	合計
	986.7 万円	986.7 万円	1973.4 万円
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	所属機関・役職 (※令和7年3月31日現在)		
肥後 陽介	京都大学 経営管理大学院・教授		
大竹 雄	東北大学大学院 工学研究科・准教授		
高野 大樹	熊本大学大学院 先端科学研究部・准教授		
岡本 隆明	名城大学 理工学部・准教授		
小高 猛司	名城大学 理工学部・教授		
大瀧 諭	日本工営株式会社 河川水工部・部長		
松下 朋哉	日本工営株式会社 河川水工部・課長		
海野瀬 綾乃	日本工営株式会社 河川水工部・技師		
李 圭太	日本工営株式会社 執行役員		

⑤技術研究開発の目的・目標（様式河指-2、河指-3に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。）

本研究は、越流侵食に対して堤防の安全性を評価できる数値解析モデルを開発するとともに、被覆材を有する場合の実験から、越流・浸透により破堤に至るトリガーや裏法侵食の破堤モード、被覆材による裏法耐侵食性能を検証し、また、堤防の実際の設計・評価に実装する設計方針（案）を策定することを目的とする。具体的な達成目標を、以下の通り設定する。

【課題①】越流侵食解析には、表面流・浸透流の同時解析、および地形変化の数値モデルが必要である。流れ解析モデルと土砂輸送モデルを連成した越流侵食解析モデルを開発するとともに、堤体材料の土質条件によって侵食特性が異なる特徴をモデルパラメータによって表現し、また、掃流砂から浮遊砂への遷移を簡易にモデル化することで、堤防の越流侵食に関する高度な解析技術の開発を目的とする。

- ・ 表面流と浸透流を同時に予測可能な流れ解析モデルと掃流砂、浮遊砂を対象とした土砂輸送モデルを組み合わせ、越流侵食解析モデルを構築する。さらに、土砂輸送モデルにおいて、堤体近傍の圧力勾配の影響を考慮し、また、粒度分布による侵食特性の違いを評価するため、掃流砂・浮遊砂浮上量式中において新たなモデルパラメータを導入する。さらに、掃流砂から浮遊砂への遷移を簡易にモデル化することで、越流侵食解析のモデルの高度化を図る。
- ・ 土の弾塑性構成則を適用した粒子法と流れ解析モデルを連成した解析法を構築し、越流侵食解析を実施する。
- ・ 河川土工マニュアル参照し、堤体の材料や締固め度を変化させた実験条件のもと、越流侵食に関する小型模型実験を実施する。構築した解析法を模型実験に適用し、再現計算を実施する。
- ・ 堤体形状や堤体材料を変化させた場合での越流侵食に関する数値実験を行い、どのような条件のとき破堤への到達時間が早いのか考察する。

【課題②】裏法部の侵食を抑制するため、表面被覆材を設置した場合の越流・浸透により破堤に至るトリガー（評価指標）や裏法侵食の破堤モードを実験により明らかにする。また、既存の堤防強化手法などの様々な設計方針、それらの変状事例、表面被覆材を設置した場合の実験結果を踏まえ、「粘り強い河川堤防」表面被覆型の設計方針（案）を提示することを目的とする。

- ・ 表面被覆材、法尻保護工を設置した場合の堤防裏法の耐侵食性能を室内実験にて検証する。地盤内の浸透水ならびに堤体上の表流水、さらには被覆材と堤体地盤との境界部の流れを把握し、越流・浸透により破堤に至るトリガー（評価指標）や裏法侵食の破堤モードを検証する。
- ・ 既存の堤防強化手法、護岸、床止め、越流堤等の河川構造物の設計手法、それらの変状事例、加えて、課題①、課題②の小型模型実験で確認された実験結果を踏まえ、表面被覆型の「粘り強い河川堤防」の設計方針（案）を提示する。

⑥研究成果

(具体的にかつ明確に記入下さい。4ページ程度。)

2年間の研究期間で得た成果を以下に示す。

1. 表面流・浸透流の同時解析手法と地形変化の連成モデルによる越流侵食解析

密度関数法によって非定常流れの水面変動を追跡するとともに、ポーラスメディア法を用いて水域、堤体内、河床近傍の境界の流れを求め、表面流と浸透流を同時に予測できる3次元流れ解析モデルを用いた。この流れのモデルに、以下の2つの地形変化のモデルを連成し、越流侵食解析手法を開発した。

(1) 土砂輸送モデルを用いた越流侵食解析法

土砂輸送形態として、掃流砂と浮遊砂を考慮した。その際、河床近傍の流れの圧力勾配の影響を掃流砂、浮遊砂の移動限界に考慮してモデルを改良するとともに、堤体材料の粒度分布によって侵食特性が異なるという後述の模型実験結果をもと、掃流砂量式と浮遊砂浮上量式中に侵食特性を表すモデルパラメータを導入し、越流侵食解析法の高度化を行った。ここでは、均等係数が大きい、あるいは曲率係数が小さい場合に材料が締め固まりやすくなり、侵食しづらくなるという関数をモデルパラメータに導入した。また、掃流砂から浮遊砂への遷移を簡易なモデル化により表現した。これにより、一様珪砂の場合から、粘土から粗砂を含む幅広い粒度を有する混合土の場合まで同じモデルで越流侵食解析を可能とした。図-1は堤体材料に7号珪砂を用いた場合の越流侵食解析結果であり、Run0は掃流砂から浮遊砂への遷移なし、Run1は遷移ありの結果である。掃流砂から浮遊砂への遷移を考慮することで、裏法尻での侵食が進み、実験結果を再現できることを示した。

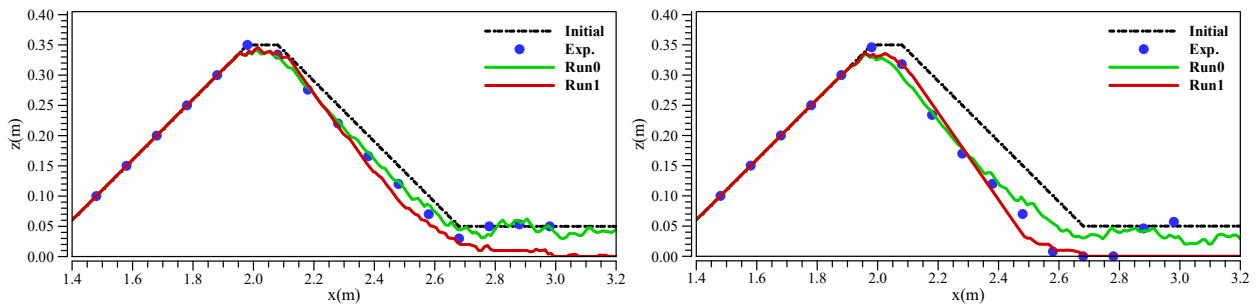


図-1 越流侵食解析結果 (左: $t = 10$ s, 右: $t = 20$ s)

図-2は河川土工マニュアルにおいて推奨される堤体材料を用いて行った後述の実験のCase3の再現解析結果である。同様な計算を実施することで、異なる粒度分布での越流侵食特性を表現するパラメータ C_e を図-3中の式(4.1)のように同定した。ここで、横軸は均等係数 U_c 、曲率係数 U'_c 、無次元限界掃流力 τ_{*c} の関数とした。

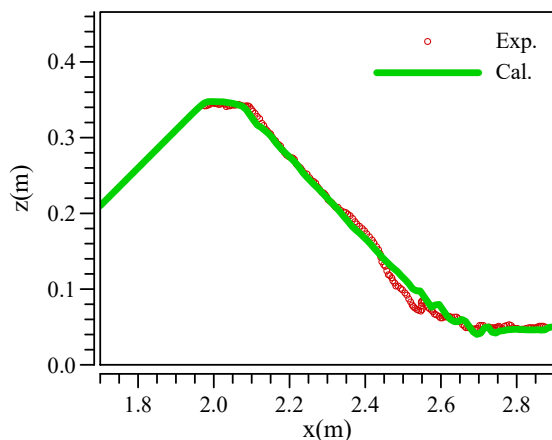


図-2 Case3の再現解析結果 ($t = 1800$ s)

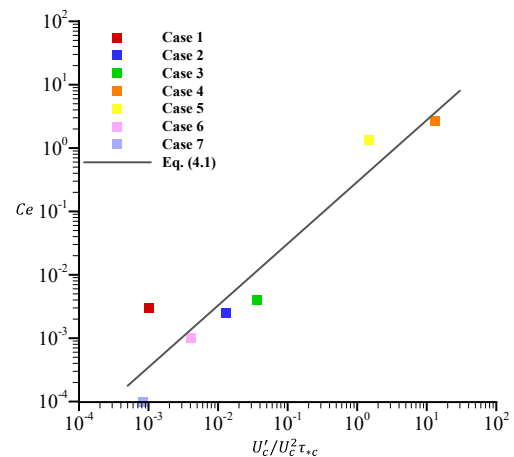


図-3 越流侵食に関するパラメータ C_e

図-4はCase3の材料を用い、締め固め度を低くした場合(Case3-L)の再現解析結果である。Case3とCase3-Lの実験結果を比較し、 C_e の値を調整することで締め固め度が異なる場合でも概ね再現できること

を示した。また、図-5 は大型模型実験（與田敏昭，京都大学学位論文，2014）での再現解析結果である。締固め度の影響を考慮して侵食係数 C_e の値を調整する（Run1）とともに掃流砂から浮遊砂への遷移を考慮する（Run2）ことで裏法尻における洗堀が再現できている。

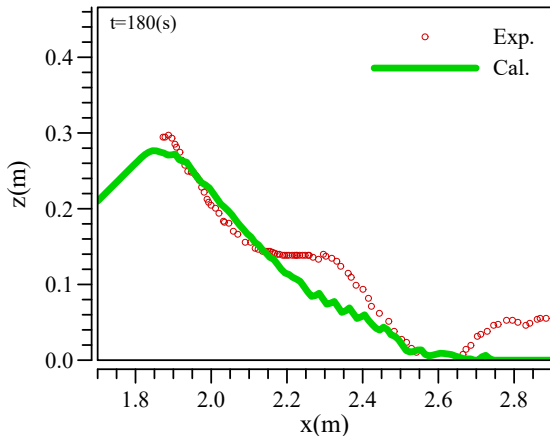


図-4 Case3-L の再現解析結果 ($t=180$ s)

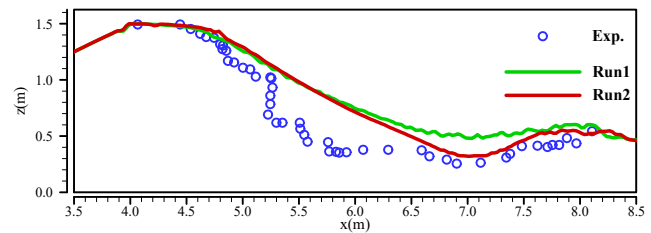


図-5 大型模型実験での再現解析結果 ($t=2520$ s)

(2) 砂の弾塑性構成式を用いた越流侵食解析法

堤体中に水が浸透すると、サクションの低下によって土の有効応力が低下し、変形が生じる。本研究では、表面流と浸透流を同時に予測できる流れのモデルを用いているが、不飽和特性を考慮した浸透流を求めることができるように流れのモデルを改良するとともに、土の弾塑性構成式と、土の運動方程式を格子の中に粒子を配置した土の大変形解析に有利な Generalized Interpolation Material Point (GIMP)法を用いて離散化した手法を連成し、越流侵食解析法を開発した。図-6 は越流侵食時の流況の時間変化を示しており、図中の白い粒子が堤体中の土の変形を表している。堤体表面を流れる表面流により、堤体の天端や法面が削られて流れ方向へ移動する様子を定性的に再現することを可能とした。

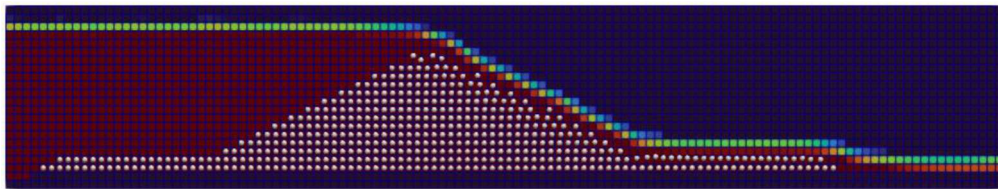


図-6 砂の弾塑性構成式を用いた越流侵食解析結果 ($t=33.8$ s)

2. 堤防の越流侵食に関する水理模型実験

堤体材料によって越流侵食特性が異なるため、様々な粒度分布、締固め度の条件のもと越流侵食実験を行う。図-7 に実験の概略図を示す。堤体の高さは 0.3m であり、流量は 3.31/s である。堤体材料については、河川土工マニュアルを参照し、珪砂や粘土の配合比を変えることで、土工マニュアル内の左寄り・中央・右寄りの材料を作成した。模型実験に用いた材料の粒度分布を図-8 に示す。図中の黒点線が土工マニュアルで示されている粒度分布を表している。Case1, 2, 3 が今回用いた材料であり、Case4, 5, 6, 7 は既往の模型実験での粒度分布である。実験結果の一部は図-2, 図-4 中の Exp. で示しており、1 の解析法の比較検証に用いた。実験結果より締固め度が高くなると、堤体の破堤時間も長くなるのが分かった。

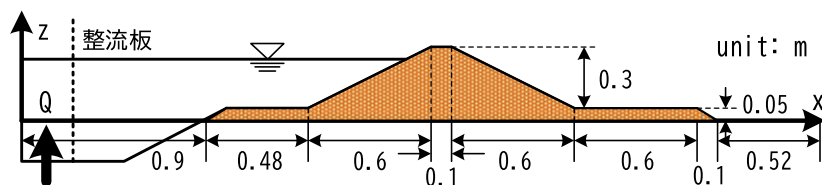


図-7 模型実験の概略図

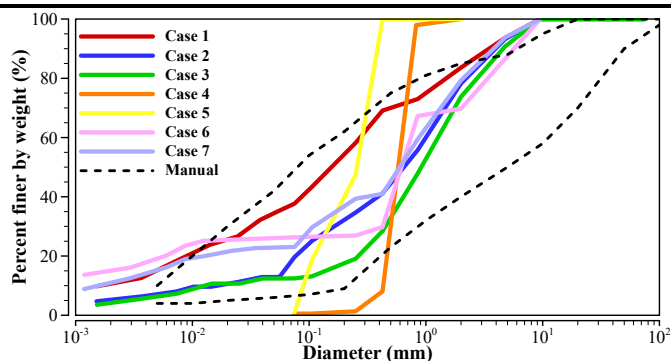


図-8 粒度分布

また、引張破壊試験を行い、引張破壊応力は堤体の締固め度、細粒分含有率が高くなるほど大きくなることがわかった。

3. 表面被覆材、法尻保護工を設置した場合の越流侵食実験

表面被覆材、法尻保護工を設置した小型堤防模型の越流侵食実験を実施し、越流・浸透によって破堤に至るトリガーや裏法侵食の破堤モードを検証した。模型実験の概略図を図-9 に、実験条件を表-1 に示す。

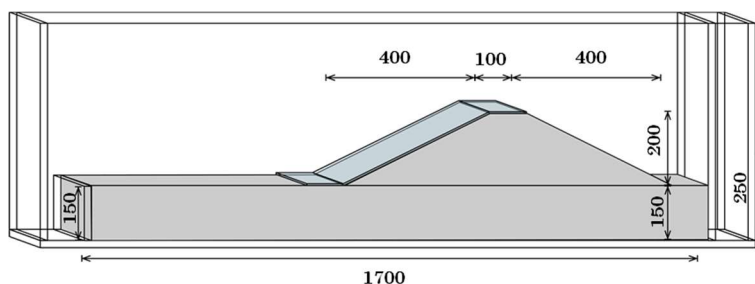


図-9 模型実験の概略図

表-1 実験条件

	H (cm)	h (cm)	U_m (cm/s)	天端・法面	法尻保護工 長さ L_f (cm)	ドレーン工
Case1	20	1	22.5	被覆工無し	0	無し
Case2	20	1	22.5	被覆工有り	0 (法尻保護工無し)	無し
Case3	20	1	22.5	被覆工有り	5	無し
Case4	20	1	22.5	被覆工有り	15	無し
Case5	20	1	22.5	被覆工有り	0	有り

被覆工がない Case1 の場合、越流直後に法尻が侵食され、時間経過とともに法尻から天端にかけて侵食が進み、川裏側、川表側の天端が消失して破堤した。表面被覆工を設置した Case2 の堤体・基礎地盤形状の時間変化を図-10 に示す。砂と水の境界を白い点線で表しており、50 s 以降では、白い点線は表面被覆材の下にも広がっており、裏法尻での洗掘に伴う吸い出し現象・内部侵食の発生により、被覆材・堤体の境界部で水みちの進展していることがわかる。表面被覆工下での内部侵食が進展し、それが天端に到達することで最終的には破堤に至ったが、無対策の Case1 と比べると大幅に破堤までの時間を伸ばすことができた。

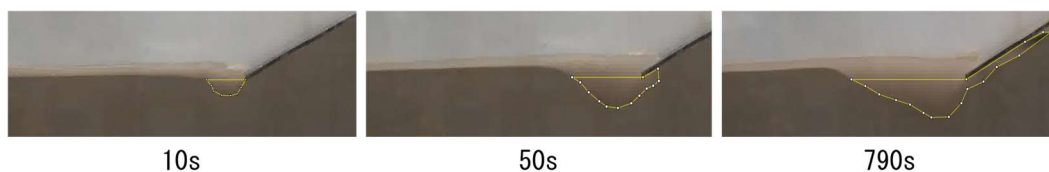


図-10 堤体・基礎地盤形状の時間変化

表面被覆工に加えて法尻に 5 cm の保護工を設置した Case3 でも洗掘孔内の流れによって堤体材料が吸い出され、水みちが天端までつながることで破堤した。法尻に 15 cm の保護工を設置した Case4 では 90 分通水したが、保護工下の土の吸い出しはみられたものの、法尻まで崩壊箇所は到達せず、堤体材料が吸い出されなかったため破堤しなかった。また、被覆工下の法尻部にドレーン工を設置した Case5 では、堤体内水位（浸潤面）の上昇を抑制することができ、90 分の通水中で堤体材料は吸い出されず、破堤しなかった。

4. 被覆材を有する裏法耐侵食性能の実験的検証と設計方針（案）の策定

表面被覆材を設置した小型模型実験結果より、裏法の表面被覆工と堤体の境界部における内部侵食が破堤に至るトリガーとなることが示唆されたため、表面被覆材の設置時の間隙水圧や法面・法変状の進行等の計測を行った。図-11 に間隙水圧計の設置位置を、図-12 に間隙水圧の時間変化を示す。間隙水圧は越水開始後より法尻付近（P3～P7）で徐々に上昇し、給水限界に至ると同時に法尻付近（特に P3～P5）で間隙水圧が急増していることが確認できる。法尻から堤体土が吸い出されることによって法尻部の水みちが発達し、そこに流れが集中することで間隙水圧が上昇したと考えられる。

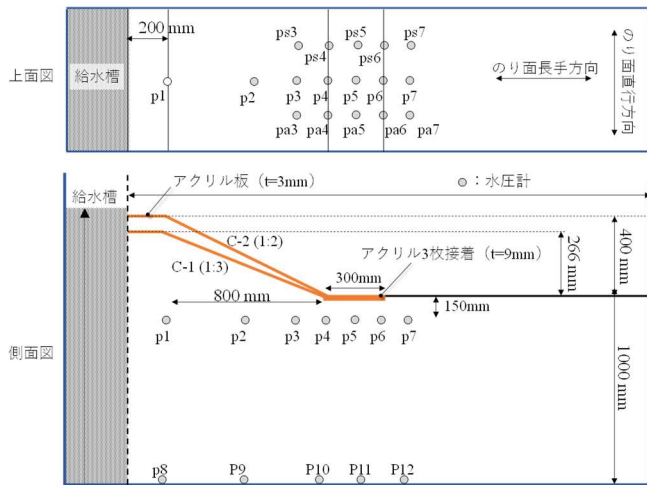


図-11 間隙水圧計の設置位置

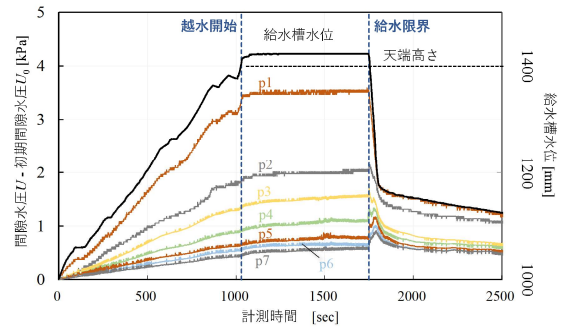


図-12 間隙水圧の時間変化

※持田祐輔，森安俊介，石濱吉郎：「粘り強い河川堤防」の破壊モード・プロセスに関する実験的研究，第 12 回河川堤防技術シンポジウム論文集，pp.79-82，2025 より

既存の堤防強化手法，護岸，床止め，越流堤等の河川構造物の設計諸元や設計手法，それらの変状事例，加えて上記の実験結果を踏まえ，表面被覆型の「粘り強い河川堤防」の設計における検討項目として表-2 に示す 5 項目を提案する。

表-2 設計における検討項目

検討項目	内容	基準等
1. 法覆工の選定	裏法護岸の表面流速を算出し「護岸工法設計流速関係表」より法覆工を選定	美しい山河を守る災害復旧基本方針
2. 法覆工の照査	1.で選定した法覆工の各構造モデルに応じた照査	護岸の力学設計法
3. 揚圧力・パイピングの照査	レインの式によるしゃ水工の根入れ長の計算	床止めの構造設計手引き 柔構造樋門設計の手引き
4. 法覆工の浮き上がりの照査	浸透流解析または上下流水位差から計算した揚圧力に対する照査	既往越流堤設計事例より
5. ドレーンの設置の検討	本構造を採用する場合はドレーンの設置を標準とする	既往実験より

⑦研究成果の発表状況・予定

(本技術研究開発の成果について、論文や学会への投稿等又はその予定があれば記入して下さい。) (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、学会妙録、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・新聞等への研究成果発表
 - ・ 学術誌へ投稿中の論文(掲載が決定しているものに限る)
 - ・ 研究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
 - ・ 研究成果による受賞、表彰等
-
- ・ 児玉真乃介, 平野大地, 音田慎一郎, 大竹 雄, 肥後陽介: 河川堤防の越流侵食解析における材料不確実性の評価手法, 土木学会論文集, Vol.80, No.16, 23-16155, 2024.
 - ・ 由井洋和, 高田息吹, 音田慎一郎, 肥後 陽介: 土の弾塑性 MPM を用いた河川堤防の越流侵食解析手法の開発, 土木学会論文集, Vol.80, No.16, 23-16172, 2024.
 - ・ Q. PANG and S. ONDA : Simulation of bar formation and levee breaching based on numerical model in curvilinear coordinate system, *Journal of JSCE*, Vol.12, No.2, 23-16175, 2024.
 - ・ 牧川星朗, 前田拓人, 南野 仁, 音田慎一郎, 肥後陽介: 異なる粒度分布を有する堤防の越流侵食過程に関する実験的研究, 土木学会第 79 回年次学術講演会講演概要集, II-90, 2024.
 - ・ 夏目将嗣, 小高猛司, 李圭太, 岡本隆明: 2次元模型実験による法面被覆型越流対策工の効果の検証, 第 59 回地盤工学研究発表会講演集, ID 23-10-1-07, 2024.
 - ・ 小高猛司, 夏目将嗣, 李圭太, 岡本隆明: 透水性基礎地盤上の河川堤防の越流決壊挙動, 第 59 回地盤工学研究発表会講演集, ID 23-10-1-06, 2024.
 - ・ 夏目将嗣, 岡本隆明, 小高猛司, 李 圭太: 越流に対する表面被覆型対策工の効果と堤体崩壊メカニズムの検討, 第 36 回中部地盤工学シンポジウム論文集, 25-32, 2024.
 - ・ 前田拓人, 音田慎一郎, 牧川星朗, 肥後陽介: 堤体土の締固め度が破堤過程に与える影響に関する実験的研究, 第 12 回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.57-58, 2025.
 - ・ 南野 仁, 音田慎一郎, 肥後陽介, 牧川星朗: 粘性土を含む河川堤防の越流侵食に関する 3次元数値解析モデルの適用性について, 第 12 回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.61-62, 2025.
 - ・ 夏目将嗣, 小高猛司, 岡本隆明, 李 圭太: 表面被覆型越流対策工の小型模型実験, 第 12 回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.73-74, 2025.
 - ・ 海野瀬綾乃, 李圭太, 大瀧諭, 松下朋哉, 岡部貴之, 小高猛司: 粘り強い河川堤防における設計照査手法の構築に関する考察, 第 12 回河川堤防技術シンポジウム論文集, pp.79-82, 2025.

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。)

該当なし。

⑨表彰、受賞歴

(単なる研究成果発表は⑧⑨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。)

地盤工学会中部支部賞（研究奨励賞），2025.4.25 受賞，
受賞者：夏目将嗣（元名城大学大学院，現日本工営株式会社），受賞テーマ：越流に対する表面被覆型対策工の効果と堤体崩壊メカニズムの検討（2024年8月に中部地盤工学シンポジウムにて発表）

⑩技術研究開発の今後の課題・展望等

(研究目的の進捗状況・達成状況や得られた研究成果を踏まえ、技術研究開発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、技術研究開発の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

堤防の越流侵食解析法は、現状ほとんど実務利用されておらず、開発が急務である。本研究では表面流と浸透流を同時に予測できる3次元流れ解析と土砂輸送を組み合わせ、さらに、掃流砂、浮遊砂の移動限界における流れの圧力勾配の影響を考慮したり、堤体材料の粒度分布によって異なる侵食特性を掃流砂量式と浮遊砂浮上量式中にモデルパラメータとして導入したりすることで、越流侵食解析法の高度化を行った。また、掃流砂から浮遊砂への遷移を簡易なモデル化により表現することで、裏法尻での洗掘などを予測できることを示した。

今後の課題として、実際の河川では河道が曲がっているため、3次元的な流れの集中とそれに伴う侵食過程を予測できるようモデルの発展が必要である。また、流れによる土砂輸送特性を堤体材料の粒度分布から評価しているが、実験データに基づく回帰式を用いているため、更なるデータの収集と結果の分析、実物大ケースでの比較検討が必要である。

被覆材を設置した場合については、被覆材を設置することによる堤防裏法面の圧力の上昇を表現し、設計における検討項目に取り入れる必要がある。また、「粘り強さ」を発揮するためドレーンの規格の考え方について、今後議論する必要がある。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本技術研究開発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。)

堤防の越流侵食解析法について、室内模型実験や実河川での適用を通してモデルの妥当性が検証されれば、今後の河川整備や実務での検討に活かされると考えられる。

また、被覆材を設置した場合において、今回の実験結果より越流・浸透によって破堤に至るトリガーや、法尻保護工やドレーン工の効果について確認することができた。こうした知見は実務に活かされられると思われる。