

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
	肥後 陽介 (ひご ようすけ)	京都大学 大学院工学研究科	教授
②研究テーマ	名称	越流侵食に対する河川堤防のロバスト設計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3年度	令和4年度	合計
	986.7万円	986.7万円	1,973.4万円
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 年3月31日現在)		
音田 慎一郎	京都大学 大学院工学研究科・准教授		
大竹 雄	東北大学 大学院工学研究科・准教授		
高野 大樹	港湾空港技術研究所・主任研究官		
片山 政和	株式会社 日建設計シビル・部長		
加藤 亮輔	株式会社 日建設計シビル・主管		
由井 洋和	株式会社 日建設計シビル・技師		
児玉 真乃介	株式会社 日建設計シビル・技師		

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、越流侵食に対する堤防のロバスト性（粘り強さ）を評価する手法を開発し、堤防の実際の設計・評価に実装するフレームワークを提示することを目的とする。具体的な達成目標は、以下の通り設定する。

【課題①】越流侵食解析には、表面流・浸透流の同時解析及び表面流による土の侵食解析が必要である。これらを連成した、越流侵食解析手法を開発する。

- ・表面流・浸透流を同時に解析可能な手法と土の弾塑性粒子法を連成した解析法を有しており、浸透破壊解析へ適用済みである。この既存コードを越流侵食解析へ適用する。
- ・表面流・浸透流解析に新たに粒度分布を考慮した掃流砂モデルを適用したコードを作成。
- ・構築した解析法により、別途実施する模型実験の再現解析を実施する。

【課題②】降雨外力と堤防物性に着目し、それぞれのモデルパラメータの不確実性による解析結果の変動を確率論によって定量化する。確率変数にするための多数計算に耐え得るよう、次元縮減による代替解析手法を提示する。

- ・対象とする河川に起こり得る水位波形を多数発生させる。これをモデル化し各波形に対するパラメータセットを用意する。また、対象河川に存在する堤体材料の物性データを可能な限り収集し、これらを表現する越流侵食解析のパラメータセットを用意する。
- ・パラメータセットのデータバンクの固有直行分解(POD)あるいはこれに準ずる分析を実施し、主要な数成分に次元縮減する。幾つかの代表的パラメータセットで越流侵食解析を実施し、解析結果をPOD等により主要な数成分に次元縮減する。代表的パラメータセットは、実験計画法を用いて主成分空間から最適なセットを抽出する。これらの主要な成分を回帰分析で結合することにより、越流侵食解析の代替モデルを構築する。
- ・不確実性を考慮した水位波形及び堤防物性における、全ての解析を実施する。これにより、当該河川で起こり得る全ての降雨被災シナリオをそろえる。

【課題③】代替解析による多数計算により、あらゆる外力・堤防物性に対してのシナリオを提示し、その中から粘り強いシナリオを抽出する。粘り強いシナリオを定量的に評価する手法を確立することにより、越流に対する堤防のロバスト設計を実現する。

- ・全シナリオを破堤モードごとにクラスタリングする。これにより、脆性的な破堤モードと粘り強い破堤モードに分類するとともに、それぞれの確率を提示する。
- ・粘り強い破堤モードに至る水位波形、堤防物性を特定する。特定した条件の中から代表的な条件で、詳細解析（越流侵食解析）を実施することで、堤防のロバスト性を検証する。
- ・これまでの検討は一断面に対するものであったが、これを対象河川の縦断方向へ展開する。堤防断面形状をデータ化し、他のパラメータと同様に次元縮減する。水位波形と堤防物性を用いた数値解析の実験計画を立案し、これらの数値解析結果を用いた代替モデルにより、縦断方向のあらゆる断面の耐越流侵食性能を評価する。

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・浸透流解析手法と土の弾塑性解析手法との連成モデルの作成

表面流と浸透流を同時に予測できる3次元流体解析モデルとして(FVMモデル)、非定常流れの水面変動の追跡に密度関数法、水域、堤体内、境界の流れの解析にはポーラスメディア法を用いた。これを基に、越流侵食挙動を表現するため、以下の2つの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

掃流砂と浮遊砂の量を表面流によって土に作用するせん断力から評価する。従来、土に関するパラメータは平均粒径とそれによって決まる限界掃流力のみであったが、これに、粒度分布(均等係数、曲率係数)の影響を考慮し、堤防の締め固まり度合いを簡便に考慮する手法を提案した。これにより、単粒度に近い砂(図1)、細粒の粘土から粗粒の砂まで幅広い粒度を有する混合土、粒度にギャップのある混合土に対する越流侵食挙動の表現を可能とした(図2)。

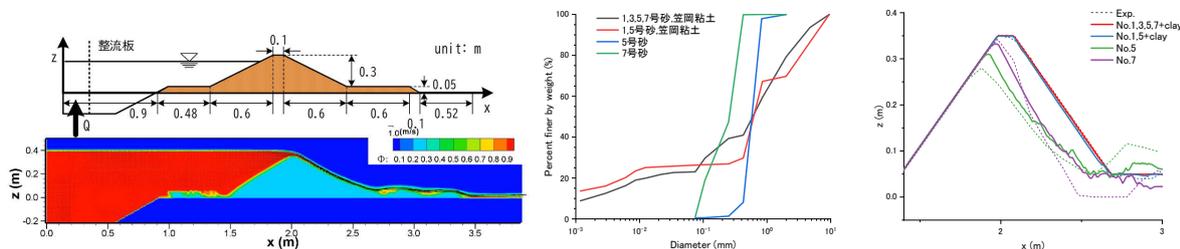


図1 FVMによる越流侵食解析結果(珪砂7号) 図2 各種土材料の粒度分布と越流侵食解析結果

(2) 土の構成式と粒子法を用いた越流侵食解析法

不飽和状態にある堤体に水が浸透すると、サクシジョンの低下により土の有効応力が低下することにより変形が生じると共に、変形・強度特性が変化する現象を表現するために、土の弾塑性構成式を適用し土の運動方程式を粒子法的一种であるMaterial Point Method(MPM)で解法する手法を提案した。(1)の解析手法により表面流・浸透流を解き、表面流によるせん断応力をMPMに導入することで、越流侵食解析法へ拡張した(図3)。解析結果は、表法および裏法からの浸透、越流後の表面流による土の変位を定性的に表現している。妥当性の検証には至らなかったが、越流侵食解析への適用性を確認した。

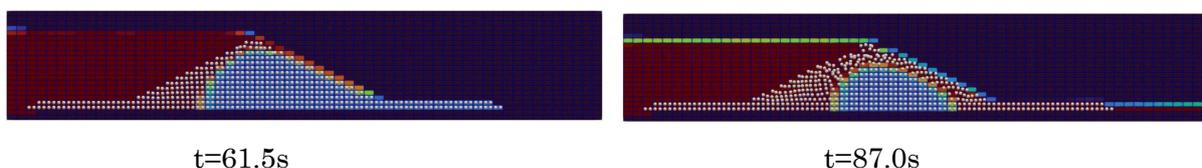


図3 MPMによる越流侵食解析結果

2. 越流侵食実験の実施と再現解析

表面被覆型堤防を模擬した天端保護工、裏法尻保護工、裏法保護工を設けた堤防模型、および堤体内に自立型堤防を設置した堤防模型の越流侵食実験を実施した。実験室での模型実験のため堤体高さは30cmと限られていることから、本実験は定性的な挙動観察と解析法の妥当性検証の位置づけとして実施した。

堤体材料には、粒径が揃っており侵食速度の速い7号珪砂を使用した。表面被覆型堤防の改良工は、ステンレス板の表面に摩擦を確保するため堤体材料の7号珪砂を貼り合わせて作成し、自己自立型堤防の改良工はステンレス板を接合しT字型の構造を作成し、これらの組み合わせで種々のケースの実験を実施した(図4)。

土堤のケース B に天端保護工を設置するだけで、天端の消失はなくなり堤体高さが維持される結果となった。ただし、構造物周りの浸透によって堤体の強度が弱くなる場合があった。天端に加えて、裏法および法尻を被覆することで、侵食は格段に抑えられる結果となった。自立型堤防 E のみの場合は、水圧で自立型堤防が転倒したが、天端 B との組み合わせにより堤体高さが維持された。(図 5)。

1. (1) で開発した越流侵食解析手法を用いて実験の再現解析を実施し、解析手法の妥当性を検証した。河床面の位置が安息角(35°)を越えた隣り合うセル間において、土砂の移動が行われる河岸崩落モデルを適用している。しかし、実験では締め固め作業を施しているために構造物設置箇所は初期の堤体高を維持しており、裏法肩付近で勾配角が約 80° となり安息角を大きく超えていることが確認された。そこで本研究では構造物設置範囲及び裏法肩から裏法尻までの範囲で河岸崩落モデルの適用を無くすことで数値解析を行った。図 6 に示すように、天端保護工を有する越流侵食実験の様子を上手く表現した。この他、一部自立型堤防の解析も実施し、実験結果を再現し得ることを確認した。

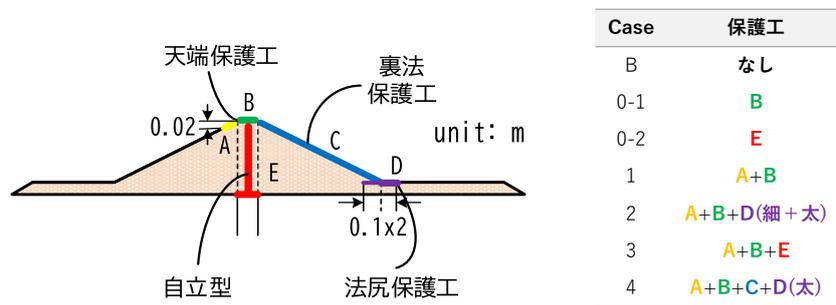


図 4 越流侵食実験の堤防断面と改良工位置図および実験ケース

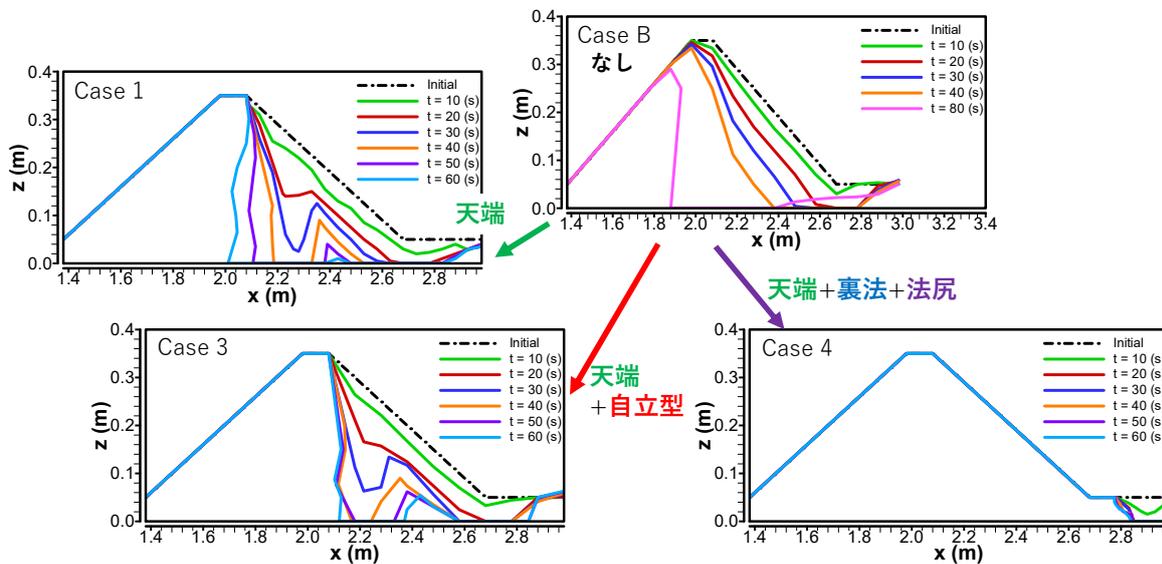


図 5 実験結果：時刻 t における堤防形状のスケッチ

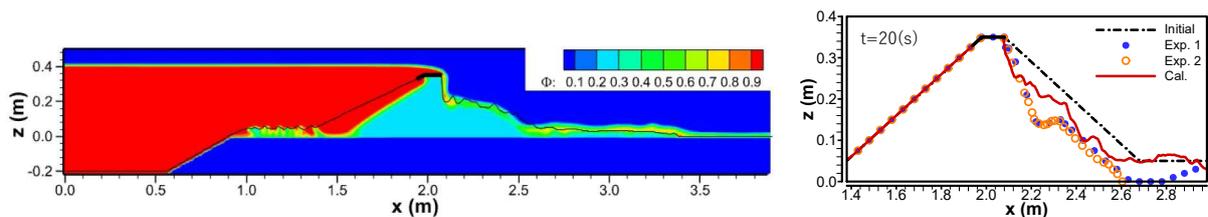


図 6 天端保護工を有する越流侵食実験の再現解析

3. 越流侵食に対する河川堤防のロバスト設計法のフレームワーク

降雨外力，堤防材料，堤防形状の不確実性を評価した．主成分分析と実験計画法により定めた堤防形状 5 種類と堤防材料 9 種類の 45 ケースに対して FVM モデルを用いた越流侵食解析を実施し，その結果を用いて構築したガウス過程回帰による代替解析法で，あらゆる堤防材料と堤防形状に対する越流侵食シナリオの解析結果を得ることで，上流から下流までの河川全域の断面における脆弱性カーブを作成した．さらに，初年度に生成した各断面における水位ハイドログラフを用いて作成したハザードカーブとの対比から，越流侵食に対する破壊確率を定量化する，河川堤防のロバスト設計法のフレームワークを確立した（図 6）

STEP-1 主要成分の抽出と不確実性のモデル化

(1) 降雨外力の不確実性

対象河川を阿賀野川と設定し，河川整備基本方針の代表洪水 9 パターンに近年観測された大規模な洪水 2 パターンを加えた 11 パターンの降雨波形を対象に流出計算を実施した．降雨波形は，6 つの確率規模（最小流量確率,1/100,1/300,1/500,1/1000, 想定最大）に引伸ばし，それぞれに対する流量ハイドログラフを算定した．流量ハイドログラフに溢水・戻りを考慮してピーク流量を設定し，HQ 式から水位ハイドログラフを得た．

(2) 堤防物性の不確実性

阿賀野川河川事務所の協力を得て，阿賀野川堤防において調査されている粒度分布を入手し，越流侵食解析に必要な，各粒度，均等係数，曲率係数をリストすることによりパラメータ群を設定した．降雨外力と同様に，固有直行分解による次元削減を行い，主要な三成分によって全てのパラメータ群を再現可能であることを確認した．これにより，阿賀野川堤防で調査されているあらゆる粒度分布を再現することができる．

(3) 堤防形状の不確実性

同じく阿賀野川河川事務所の協力を得て，上流から下流までの 340 箇所の堤防データを収集した．形状データを表法幅，裏法幅，堤体高さ，天端幅，平均動水勾配の 5 つのパラメータに代表させ，これらの形状パラメータ群の固有直行分解を行い，固有空間に射影した堤防形状パラメータに対して，k-means 法によるクラスター分析を行った．その結果，阿賀野川の堤防形状は 5 つの代表的な堤防形状（平均動水勾配が小さい形状，大きい形状，川表の法幅が大きい形状，裏法の法幅が大きい形状，堤体幅・堤体高が小さい形状）にクラスタリングされた．

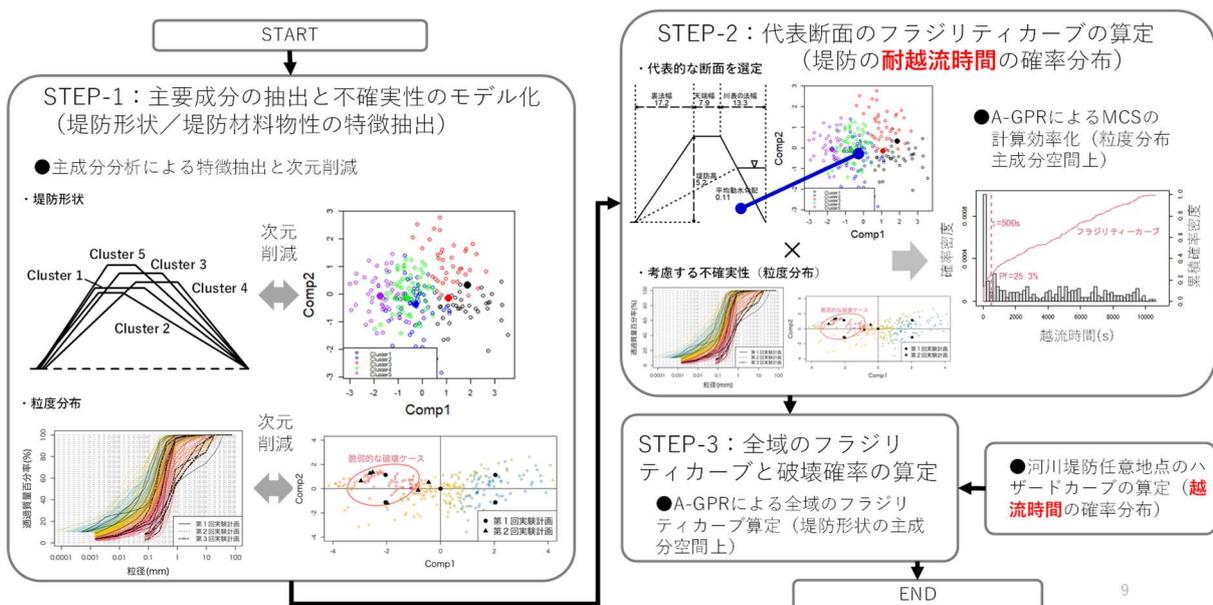


図 6 降雨外力のパラメータ群の設定

STEP-2 代表断面のフラジリティカーブの算定

代表的な 5 つの堤防形状の断面に対して、それぞれ 9 つの代表的な堤防物性に対して越流侵食解析を実施し、堤防物性の主成分空において、ガウス過程回帰によりあらゆる粒度の土における越流侵食解析の代替解析を実施した。その結果から 5 つの代表断面に対して、越流水浸 30cm、堤防高さ 2/3 になる時間を破壊の指標として、フラジリティカーブを算定した (図 7)。

代表断面間の違いは明瞭ではなく、堤防形状の感度に比べて、粒度分布特性の感度が大きいことを示している。フラジリティカーブより、越流時間が 3 時間を超過すると急激に侵食抵抗性が低下し、破堤に至る可能性が高くなる傾向が読み取れる。これは侵食が表法肩に達した時間に相当する。

STEP-3 全域のフラジリティカーブと破壊確率の算定

STEP-2 で 5 つの代表断面で算定したハザードカーブを用いた、堤防形状の固有空間上におけるガウス過程回帰により、あらゆる形状、すなわち上流から下流までの全域の断面におけるハザードカーブを算定した。また、STEP-1 (1) で得た水位ヒドログラフから再現期間の 1 年超過確率と越水時間を表す各断面のハザードカーブを算定した。ハザードカーブとフラジリティカーブを用いて各断面の破壊確率を算定した。なお、既往研究において算定したパイピングやすべり破壊に対する破壊確率も考慮し、各断面における破壊確率の最大値分布を作成した (図 8) パイピングやすべり破壊等は、河川堤防の局所的な形状の特徴や基礎地盤の特徴に高い感度を有しているため、局所的に破壊確率が大きくなる危険箇所が点的に存在している。一方で、越流侵食に対する破壊確率はなめらかに縦断方向に分布している。これは、先の検討から、越流侵食は堤防形状に対する感度が小さいことが影響していると考えられる。また、現場で計測された粒度分布を用いて、その現場のフラジリティカーブをベイズ更新する方法を提案した。

以上のように、河川全域の破壊確率を算定するフレームワークを力学的根拠に基づく数値解析の代替解析法で作成したフラジリティカーブとハザードカーブを用いて実現した。つまり、堤防が越流侵食に耐える時間と河川水が堤防を越水する時間を対比して破壊確率を算定する本手法は、「時間」および「安定」を合理的に考慮した「粘り強さ」の評価手法と言える。

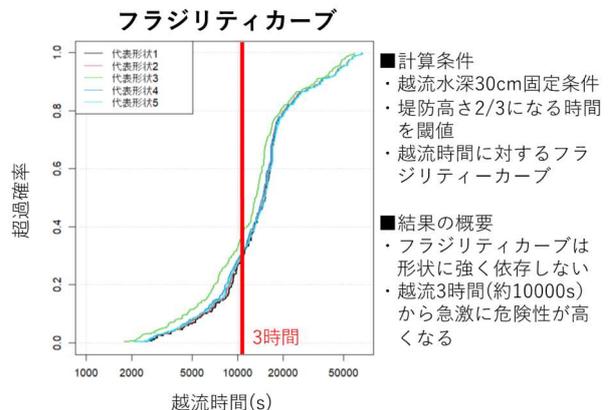


図 7 代表的な 5 断面において算定したフラジリティカーブ

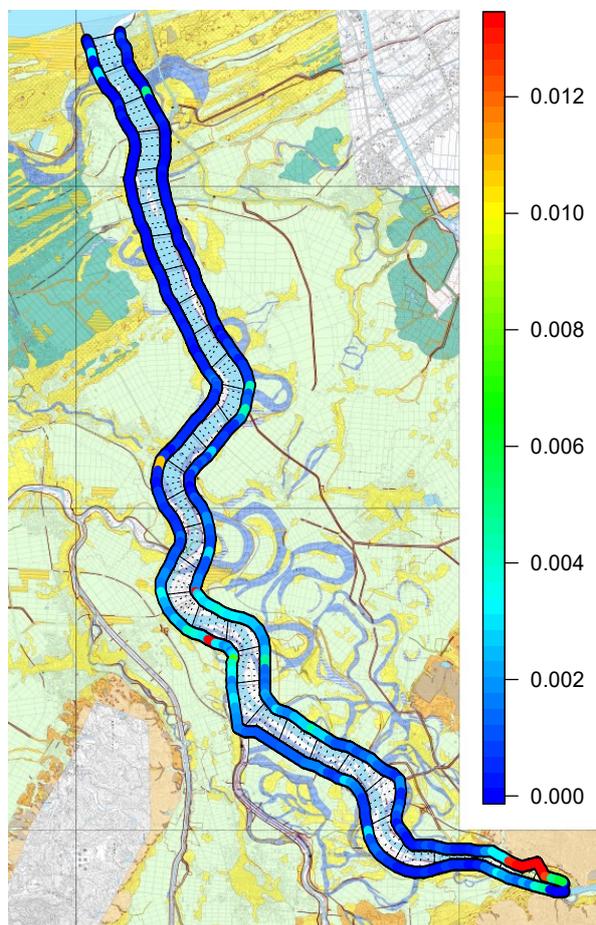


図 8 破壊確率の最大値分布 (阿賀野川)

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

音田慎一郎, 木本 康太, 肥後陽介: 浸透による堤防裏法尻の破壊に関する数値シミュレーション, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.77, No.2, pp.I_649-I_654, 2021.

音田慎一郎, 清水皓一, 山口凌大: 浮遊砂の影響を考慮した堤防の越流侵食に関する数値シミュレーション, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.77, No.2, pp.I_703-I_708, 2021.

音田慎一郎, 山口凌大, 金井稔, 河床近傍の圧力勾配の影響を考慮した堤防の越流侵食に関する数値シミュレーション, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.78, No.2, pp.I_1213-I_1218, 2022.

金井 稔, 音田慎一郎, 肥後陽介, 清水皓一, 大竹 雄, 堤体材料の混合比率が破堤過程に与える影響について, 土木学会第 76 回年次学術講演会講演概要集, 2021.

吉川峻, 竹川遊大, 肥後陽介, 音田慎一郎, 粘着性土・非粘着性土の表面侵食解析への弾塑性 MPM への適用性, 第 57 回地盤工学研究発表会, 2022.

吉川峻, 竹川遊大, 肥後陽介, 弾塑性 MPM の粘着性土に対する侵食崩落解析, 第 58 回地盤工学研究発表会, 2023.

高田息吹, 由井洋和, 音田慎一郎, 肥後陽介, FVM-MPM 連成手法の河川堤防の越流侵食解析への適用, 第 58 回地盤工学研究発表会, 2023.

以上

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。)

該当なし

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。)

越流侵食の予測解析法は、現状ほとんど実務利用されておらず、開発が急務である。表面流、浸透流、浸透による土の変形・破壊および強度特性の変化、表面侵食と多くの物理現象をモデル化する必要があるが、実務実装を考えた場合、複雑な理論とそれに伴う多くのパラメータ設定はできるだけ回避することが重要である。このため、可能な限り精緻な解析手法と実務において容易に入手可能なデータに基づく簡易な解析手法の両面での技術開発を推し進める。また、これらの手法の妥当性検証のための実験データの集積も重要である。

堤防材料、堤防形状、降雨外力を含む越流時に考え得る不確実性の評価が、効果的な堤防強化において重要である。あらゆるシナリオを想定し、最悪シナリオを特定することにより、その因子である材料特性や外力特性に対処することで、的確な堤防強化が可能となる。また、表面被覆型堤防、一部自立型堤防の実験とその再現解析により、堤防強化工の評価も可能とした。本研究では、上流から下流までの河川全域における破壊確率を評価し得る手法を提案しており、今後の流域治水の概念における治水計画の設計法および評価法として寄与し得る。

今後の課題としては、実物大堤防スケールにおける越流侵食解析手法および堤防強化工の妥当性検証、越流水浸の異なる洪水への適用性検討が挙げられる。

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。)

越流時の堤防のロバスト設計法のフレームワークとして、河川整備や管理実務に活かされる。外力と堤防物性の不確実性を考慮することで、あらゆる外力・堤防に対する越流シナリオを想定することが可能となる。

本手法は解析手法を選ばない手法であり、今後の更に改良された解析手法、別の解析手法を容易に適用できる。また、外力と堤防物性以外の不確実性もデータ化あるいはモデル化することで評価が可能である。汎用性が高く河川堤防の整備・管理への実装の実現性は高い。

同様のコンセプトで土質物性の不確実性から地震解析結果の変動幅を評価可能な手法の港湾構造物の設計への適用を進めており^{*}、越流侵食に対する河川堤防の設計に対しても、導入可能性、実現可能性は高い。(※ ISSN1346-7328, 国総研資料 第1100号, 令和2年3月)