

令和元年6月11日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2018

課題番号：17H04936

研究課題名(和文) 堤体材料の不確実性を考慮した破堤リスク評価手法の開発

研究課題名(英文) Development of method for evaluating the risk of levee breaching due to overtopping flow considering uncertainty of levee material

研究代表者

八木澤 順治 (Yagisawa, Junji)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：70549998

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 10,430,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、堤体侵食過程を高精度で評価できる計算モデルを構築した。その際、従来あまり着目されていなかった、粘性土の移動限界とそれの浸透に伴う変化を組み込んだ。構築したモデルをもとに、破堤に及ぼす影響が大きい堤体土壌の土質パラメータを感度分析により明らかにした。その結果、透水係数、細粒分含有率、乾燥密度が破堤に至るまでの時間に大きく影響することが明らかとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、堤体の越流侵食過程を評価する際、従来着目されていなかった、粘性土の移動限界とそれの浸透に伴う変化を組み込んだ数値解析モデルを構築した。構築したモデルをもとに、越流侵食の進行に影響が大きいと考えられる堤体土壌の土質パラメータを感度分析により検討したところ、透水係数、乾燥密度が破堤に至るまでの時間に大きく影響することが明らかとなった。本検討手法および結果をもとに、空間的に土質パラメータがばらつく堤防に対して、越流前に破堤リスクの高い箇所を抽出可能な手法につなげることができると考えられる。

研究成果の概要(英文)：A numerical simulation model that can evaluate the erosion process of the levee with high accuracy was developed in this study. The effect of fine fraction content and water content of levee soil, which has not been considered much in previous studies, on detachment of cohesive soil is incorporated into this model. Using the developed model, soil properties of the levee soil that have a large impact on the breaching were clarified by sensitivity analysis. As a result, it became clear that the hydraulic conductivity, fine fraction content and the dry density greatly affect the time to breaching.

研究分野：水工学

キーワード：堤防越流 侵食 浸透流 粘性土

1. 研究開始当初の背景

近年、我が国では破堤を伴う洪水氾濫被害が多発している。我が国における堤防の破堤原因としては越流によるものが約 7-8 割を占めており、越流時における堤体の侵食機構を把握することは対策を考える上で非常に重要である。そのため、越流水及び堤体侵食現象を高精度に追跡できる計算モデルの構築が求められている。河川工学分野では越流時における堤防侵食プロセスの解明に関して、多くの実験的検討が実施されているのに対して、数値解析に関する研究事例はそれほど多くない。その原因として、堤防の越流破壊現象が極めて急勾配の移動床水理であることに加え、浸透、侵食、局所的なすべり破壊などが複雑に絡んだ現象であるためモデル化を困難にしていることが挙げられる。そこで、研究代表者は、**図-1** に示すような各現象(越流流れ、浸透流、土砂移動、すべり破壊)を相互作用系として捉え、連動して解析可能な堤防侵食モデルを開発済みである(H26-27 若手(B))。本モデルを水理模型実験で実施された堤体侵食実験に適用し結果を比較すると、従来の越流流れのみで侵食量を評価するモデルよりも精度は大きく改善された。しかしながら、本モデルを現地に適用し破堤リスク評価をする場合大きな課題に直面する。すなわち、水理模型実験のように堤体材料を理想化した状態では、堤体材料の浸透、強度特性が既知であるが、実際には堤体材料は場所のみならず同一断面でも異なるため、解析結果に大きな影響を及ぼす堤体地盤特性の把握が困難という点である。近年では物理探査技術の発達や国土交通省等が国内の主だった 1 級河川を対象に 1km ピッチでボーリングを実施、情報を公開しているものの、面的なデータの取得には至っていないのが現状である。さらに、堤体内の浸透や越流規模に大きな影響を及ぼす洪水の水位上昇特性も不確実性が強く、画一的に決定することが困難である。

上記のような背景のもと、現時点で不確かな情報が多い中で破堤予測においては、発生し得る洪水に対して確率論を用いることで越流規模を包括的に捉えるとともに、場所によって異なる堤体地盤内の浸透・強度特性(透水係数、粘着力、内部摩擦角等)に対して様々なシナリオを設定することで、破堤リスクを評価する総合的なリスクマネジメントシステムの開発が必要であるという着想に至った。

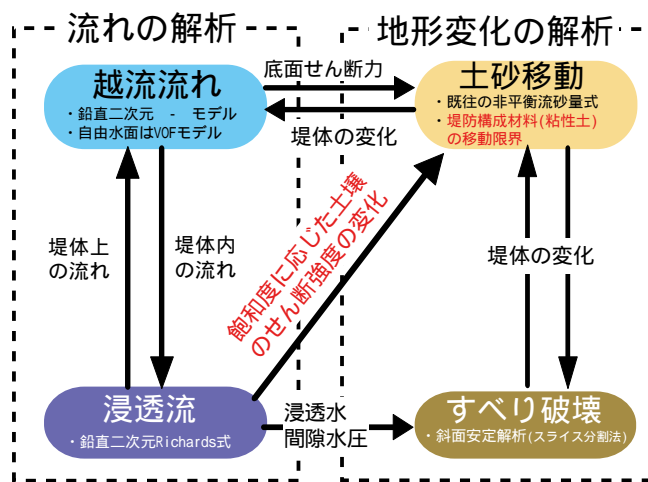


図-1 開発済みの越流侵食モデル概要

2. 研究の目的

破堤を伴う洪水氾濫は人命にも関わる大きな被害を伴う。そのため、堤防の破堤リスクを把握するため、越流水および堤体侵食過程を高精度で評価できる計算モデルの構築が期待されている。しかし、堤体地盤材料および洪水時の水位上昇特性の不確実性のため、破堤リスクの把握を困難にしている。そこで本研究では、リスクマネジメントの観点から越流時の破堤確率評価手法の提案を行う。その際、不確実性の高い堤体材料の浸透・強度特性に確率変数を用い、洪水特性によって複数解を持つ堤体の破堤予測モデルを構築し、繰り返し計算のもと各変数が破堤に及ぼすリスクマップを作成する。その結果をもとに破堤危険度の高い箇所の抽出、さらには、リスクを低減させるために効果的な対策を提案するリスクマネジメントシステムの開発を目的とする。

3. 研究の方法

研究期間の 2 年間に於いて、主に、1:数値計算モデルの改良、2:代表的な土質・水理パラメータのパラメトリック解析に基づく破堤リスクに及ぼす影響の把握、を実施した。以下に上記 2 点の研究手法の概略を示す。

(1) 浸透に伴う土壌の移動限界変化を考慮可能なモデルの開発

浸透・越流侵食解析モデルは、越流流れ解析、堤体内の浸透流解析、堤体の侵食解析の 3 つの解析モデルから構成されている。越流流れ解析には、数値波動水路 CADMAS-SURF(鉛直 2 次元 κ - ϵ モデル+VOF 法)を使用した。非定常の飽和・不飽和浸透流解析は、圧力水頭ベースの Richards 式を支配方程式としており、van Genuchten 式を関係式として用いた。代表断面の鉛直 2 次元の解析を行う。堤体の侵食量計算は、サクシオンによるせん断抵抗の増加を考慮した pick-up rate 式(式(1)~(3))を用いた。

$$p_s \sqrt{\frac{d}{(\sigma/\rho-1)g}} = F_0 G_s \tau_s \left(1 - \frac{k_p \phi \tau_{s,c} + \tau_{s,inc}}{\tau_s} \right)^{m_p} \quad (1) \quad G_s = \frac{\cos \psi + k_L \mu_s}{1 + k_L \mu_s} \quad (2)$$

$$\varphi = \frac{\mu_s \cos \theta_b - \sin \theta_b \cos \alpha + k_L \mu_s}{\cos \Psi + k_L \mu_s} \quad (3)$$

τ_* : 無次元掃流力, τ_{*c} : 無次元限界掃流力, τ_{*suc} : 無次元化したサクシオンによるせん断抵抗増分, σ : 河床材料の密度, 水の密度 ρ ($\sigma/\rho=2.65$), d : 土粒子の粒径, θ_b : 河床最大傾斜方向の勾配角, k_L : 抗力と揚力の比(=0.85), μ_s : 砂の静止摩擦係数(=0.7), Ψ : 河床付近の流速と砂粒移動方向のなす角度, α : 砂粒の移動方向と河床の最大傾斜角のなす角度である. 定数については, $F_0, m_p, k_p = 0.03, 3.0, 0.7$ を与えた. サクシオンによるせん断抵抗増分(式(4))及び無次元化した式(式(5))は, 既往研究²⁾より次式で計算した.

$$\tau_{suc} = |u_a - u_w| \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi = \rho g |\varphi| \left(\frac{\theta_w - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \tan \phi \quad (4) \quad \tau_{*suc} = \frac{2\tau_{suc}}{C_D \rho (\sigma/\rho - 1) g d \left[\frac{u_b}{u_*} \right]^2} \quad (5)$$

ここで, $|u_a - u_w|$: サクシオン, θ_w : 体積含水率, θ_s, θ_r : それぞれ飽和及び残留体積含水率, ϕ : 飽和土における有効せん断抵抗角(内部摩擦角), φ : 圧力水頭, C_D : 抗力係数, u_b, u_* : それぞれ土粒子に作用する底面流速, 摩擦速度, である.

式(4)からわかるように, 越流初期(不飽和状態)ではサクシオンによるせん断抵抗が生じることと堤体表面の耐侵食性が生じるが, 浸透が進み飽和状態に達すると, 式(5)で示されるせん断抵抗増分が0となり, 従来よく報じられているような粘性土の侵食限界に従うことになる. このように浸透流と越流をカップリングして計算することで, 越流中における堤体の含水率の変化に応じて, 侵食量が増減することを評価可能なモデルとした. 本計算モデルの有効性は, 別途実施した室内での堤防越流侵食実験結果をもとに4章にて報告する.

(2) 浸透・越流侵食に影響を及ぼすパラメータの変化が破堤時間に及ぼす影響

改良した浸透流・越流を連動した堤体侵食モデルで侵食過程を評価する際, 土質・水理パラメータとして透水係数, 細粒分含有率, 土壌密度(本検討では乾燥密度)が侵食過程に密接に関係している. また, これらのパラメータは, 粘着性を有する土壌の侵食を評価する際に用いられる侵食速度式に関する数多くの既往研究においても, 代表的パラメータとして用いられている. さらに, 日本の河川堤防(主に一級河川)においても, 縦断方向に1-2kmピッチで土質情報として統一してデータが取得されている状況にあり, 実河川堤防に適用する際にも有力なパラメータとなる可能性は高い. そのため, 本検討では, それらの不確実性(空間的なばらつき)が破堤リスク(破堤に至るまでの時間)に与える影響を把握するとともに, 上記3つのパラメータのうち, どれが破堤現象に感度が高いかを把握する. 以下に検討手法・手順を示す.

モデル堤防の諸元, 越流時間・越流水深の設定

本計算モデルは計算負荷が非常に大きく, 実スケール堤防における長時間の越流現象を対象とする場合, 計算時間が莫大となる. そのため, 複数のパラメータを系統的に変化させ, 数多くのシミュレーションを実施するような手法には不向きとなる. そこで, スケールダウンしたモデル堤防において越流侵食計算を実施した. 想定した堤防諸元は, 実スケールで堤防高 6m, 天端幅 2m, 表法面, 裏法面の勾配がともに 1/2 の堤防を, 1/30 にスケールダウンした仮想堤防とした. 越流時間・越流水深は, 実際の堤防越流時のデータを取りまとめた既往研究を参考に, それぞれの平均値を算出し, フールド相似に基づいてスケールダウンした値(越流時間は 3616秒, 越流水深は 1.7cm)を計算条件として設定した. 本来, 越流時間や越流水深といった洪水外力は破堤リスクに対して重要なパラメータではあるものの, 計算時間の制約があったため, 固定値として検討するにとどめた.

選定した3つの水理・土質パラメータの想定範囲の設定

本検討では, 透水係数, 細粒分含有率, 乾燥密度の3つを越流侵食・破堤リスクを左右する重要なパラメータと位置づけ, それぞれを系統的に変化させた場合に破堤時間に及ぼす影響を調べた. それぞれのパラメータの設定の際に, 鬼怒川本川左岸堤防のボーリングデータ(0-100km で取得された計 833 箇所)を参考に平均値を求め, 切断正規分布に基づく乱数を与えることで, それぞれのパラメータについて計 75 個の値を求め, 入力値として用いた. 解析パターンを表-1に示す.

表-1 解析ケース一覧

| | 透水係数 (m/s) | 細粒分含有率 (%) | 乾燥密度 (kg/m ³) | 解析ケース数 (計 675) |
|--------|---|----------------------------|---------------------------|----------------|
| Case 1 | 4.9×10 ⁻⁶ - 6.3×10 ⁻² | 54.5 (平均値) | 1263 (平均値) | 75 |
| Case 2 | (75パターン) | 77.1 (+σ) | 1475 (+σ) | 75 |
| Case 3 | | 31.9 (-σ) | 1052 (-σ) | 75 |
| Case 4 | | 9.7×10 ⁻³ (平均値) | 13.4 - 83.4 | 1263 (平均値) |
| Case 5 | 1.3×10 ⁻³ (+σ) | (75パターン) | 1475 (+σ) | 75 |
| Case 6 | 7.3×10 ⁻⁶ (-σ) | | 1052 (-σ) | 75 |
| Case 7 | 9.7×10 ⁻³ (平均値) | | 54.5 (平均値) | 764 - 1693 |
| Case 8 | 1.3×10 ⁻³ (+σ) | 77.1 (+σ) | (75パターン) | 75 |
| Case 9 | 7.3×10 ⁻⁶ (-σ) | 31.9 (-σ) | | 75 |

改良した侵食計算モデルを用いた破堤時間の算出

で示した解析ケースを実施し、それぞれのパラメータが破堤に及ぼす影響を把握するにあたり、どのような堤体侵食状態が破堤かを判断する必要がある。本検討では、堤体の表法肩が堤防高の5%侵食された段階で破堤と判断し、その時の越流開始からの経過時間を当該ケースにおける破堤時間と定義した。

4. 研究成果

(1) 浸透に伴う土壌の移動限界変化を考慮したモデルの効果検証：室内模型実験への適用

模型実験条件に越流侵食解析モデルを適用し、越流開始時間から80s, 160s後について、堤体表法尻から堤体裏法尻より30cm下流までの区間において実験結果と解析結果の比較(図-2)を行った。

図-2より、サクシオンによるせん断抵抗増分の考慮の有無(凡例中の‘なし’と‘サクシオンあり’)による違いをみると、サクシオンによるせん断抵抗増分を考慮していないケースでは、考慮しているケースに比べ、かなり早く侵食が進行し、160秒後には堤体がほぼ流失している状態であることがわかる。一方、サクシオンを考慮した場合、160秒後は実験値と比較してやや過大評価であるものの、実験の侵食高に近い形で評価できていることがわかる。

一方、サクシオンによるせん断抵抗増分のモデル化に加え、細粒分が砂分(非粘着性土)の移動限界を大きくするモデル化も合わせて検討した。両者(凡例中の‘サクシオン有り’と‘サクシオン有り+細粒分’)を比較すると、80秒後の侵食比較においてはあまり差がないが、160秒後の侵食比較において天端と裏法尻周辺の侵食量に違いがみられる。すなわち、細粒分が砂分の移動限界を増大させるモデル化を加えたことで、天端や裏法尻周辺で侵食量が減少(実験値に近づく)している。これは、越流が開始したあと、天端および裏法面から浸透が進行していく際にせん断抵抗増分を考慮したこと、細粒分が砂分の移動限界を増大させる効果を取り入れた結果であり、本モデルの特徴を表している。実際に限界掃流力の増加を確認したところ、pick-up rate 式内の無次元限界掃流力 τ_{*c} が浸透流およびサクシオンを考慮しない場合(従来の解析手法)に比べて1オーダー大きくなっていて確認している。また、特に裏法尻付近で実験値に近い侵食量を評価できた要因として、裏法尻では周辺に比べ圧力水頭が大きく、浸透が早く進み、法尻における堤体表面の含水率は法面におけるそれに比べて大きくなるため、浸食速度式をカップリングしたことで、法尻洗掘を実験値に近い形で評価できたと考えられる。

しかしながら、どちらのモデル化の場合においても、実験結果よりも侵食量を過大計算している。特に天端、裏法面においてその差が大きい。モデル化による差が見られなかった裏法面については、侵食量の算出のほかに、崩落に伴うずり落ち量の計算も行っている。本計算において簡易的に安息角を設定している(砂の水中安息角を簡易的に設定)ずり落ち量の評価が影響していることが原因と考えられる。実際には粘着性を有する土壌で構成された土堤モデルであるため、砂と比較すれば、より急勾配でもずり落ちは生じず斜面を保つものと考えられるが、本計算では実際よりも早く局所的な崩落が生じると計算されるため、モデル化の差が見られにくい状況であったと考えられる。

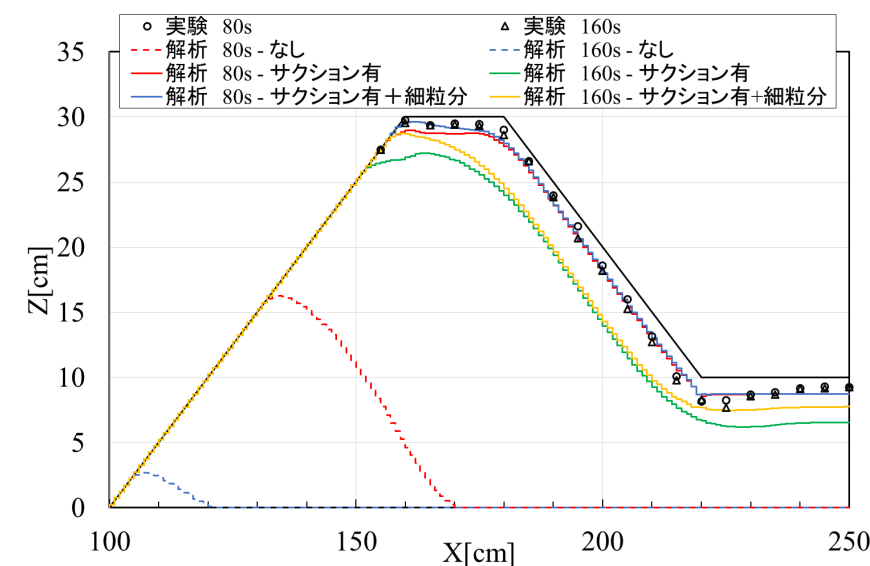


図-2 本検討で改良した越流侵食モデルで得られる侵食量と実験値との比較

(2) 浸透・越流侵食に影響を及ぼすパラメータの変化が破堤時間に及ぼす影響分析

(1)において、本研究で開発した浸透・越流侵食モデルをもとに、堤体侵食に大きく影響を及ぼすことが予想される3つのパラメータ(透水係数、細粒分含有率、乾燥密度)の感度分析(計675ケース)を実施した。その結果を図-3に示す。

初めに図-3(a)-(c)のどのケースにおいても、設定した越流継続時間(約3600秒)内に破堤す

るといふ計算結果が得られた。この原因として、越流継続時間を設定する際に参考にしたデータでは、越流水深との関係が明記されていない。すなわち、非常に小さな越流水深の段階から越流が終わるまでをカウントしたデータである。一方、本解析では、計算開始からほとんどタイムラグがない状態で、最大越流水深まで到達する。実際の堤防越流現象よりも強度の大きな越流を想定している可能性がある。こうした越流条件の詳細な設定は今後の課題としたい。そのため、ここでは、各パラメータが破堤時間に与える影響を確認する。

まず透水係数による影響を見ると(図-3(a))、透水係数が 10^{-4} から小さくなるに従って、破堤時間が増加していることがわかる。Case2(細粒分含有率、乾燥密度ともに+1 の値を与えた場合)では Case3(細粒分含有率、乾燥密度ともに-1 の値を与えた場合)と比較して2.5倍程度、破堤時間が遅れていることがわかる。一方、細粒分含有率(図-3(b))、乾燥密度(図-3(c))に関しては、両者とも同様の傾向(各パラメータの増加に伴って破堤時間も上昇)であった。Case6(透水係数、乾燥密度ともに-1 の値を与えた場合)や Case9(透水係数、細粒分含有率ともに-1 の値を与えた場合)では、他の2ケースに比べて、破堤時間が大幅に大きくなっている。これは透水係数による影響であると考えられる。本検討より、透水係数が破堤時間に大きな影響を与えるパラメータであると考えられる。

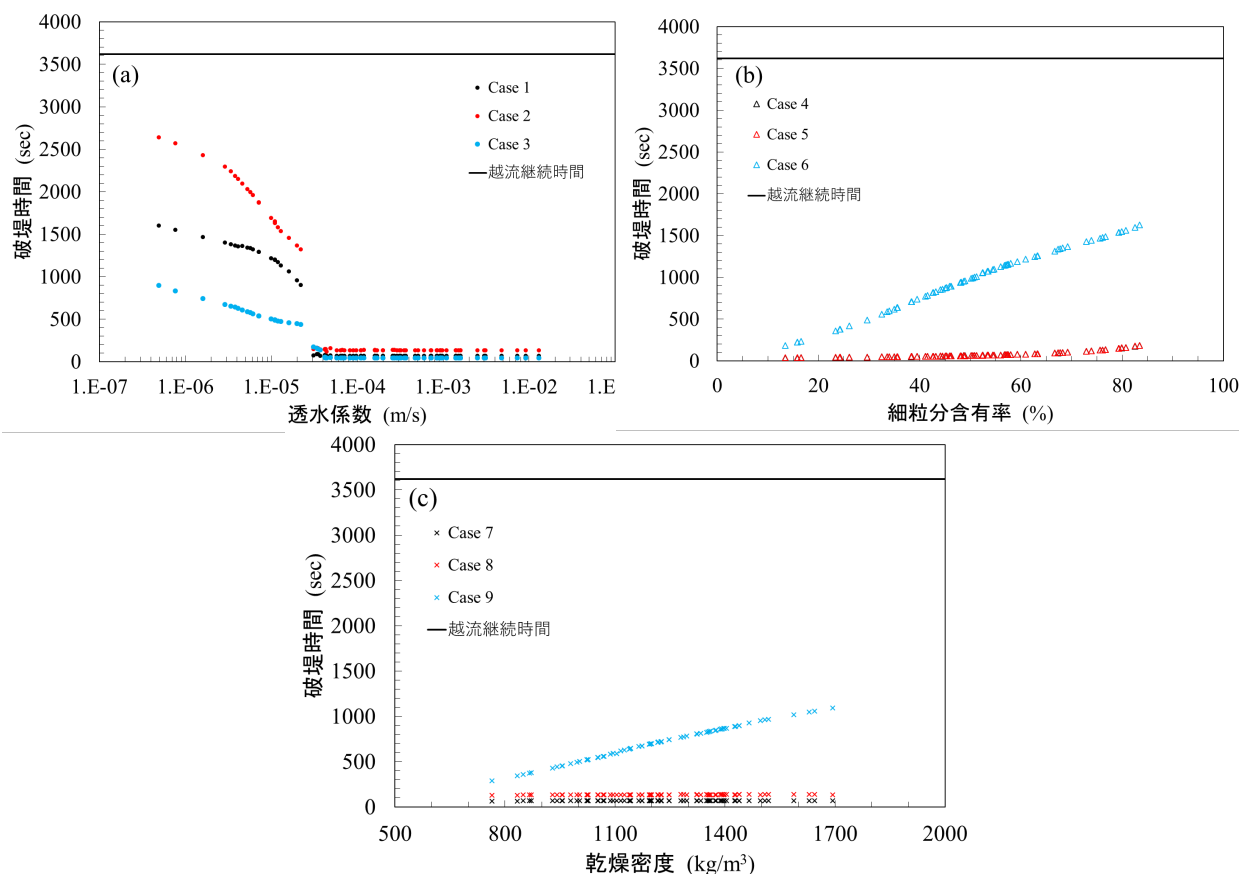


図-3 各選定パラメータの破堤時間に与える影響 (a) 透水係数, (b) 細粒分含有率, (c) 乾燥密度 (図中の Case1-9 は表-1 に対応)

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

J. Yagisawa, M. van Damme, J Pol and J Bricker, Verification of a predictive formula for critical shear stress with a large scale levee erosion experiment, 11th ICOLD European Club Symposium, with full paper review, 2019. (Accepted on 26th March).

[学会発表](計4件)

飯塚大和, 八木澤順治: 堤防天端の縦断的な波長が裏法面のガリー侵食に与える影響, 第45回土木学会関東支部技術研究発表会, 2018.

末永博, 八木澤順治: 河川堤防における不等沈下の発生状況調査, 第45回土木学会関東支部技術研究発表会, 2018.

Liaqat Ali, Junji Yagisawa: Study of levee crest undulations on scour characteristics after levee overtopping under different flow conditions, 第45回土木学会関東支部技術研究発表会, 2018.

小倉睦, 八木澤順治: 細粒分を含む堤体模型への浸潤状態に着目した河床変動解析の適用, 第45回土木学会関東支部技術研究発表会, 2018.

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。