

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17H01290

研究課題名(和文)性能設計を志向した洪水・地震に対する河川堤防のロバスト性評価手法の構築

研究課題名(英文)Development of robustness evaluation method for river levees against floods and earthquakes for performance-based design

研究代表者

肥後 陽介(Higo, Yosuke)

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10444449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 25,400,000円

研究成果の概要(和文)：地震に加え近年激甚化する豪雨による洪水に対して、我が国の河川堤防には変形を許容しても決壊には至らない性能が求められている。このいわゆる「粘り強さ」は、性能設計の枠組みでは「ロバスト性」として、構造物の安全性確保のための原則的な要求性能と位置付けられている。本研究では、1) 地震動及び越流・浸透流による堤防の進行的な変形・破壊過程(粘り)を予測可能な解析手法を開発すると共に、2) V&Vを通して提案手法の予測精度を定量化する手法を提案した。これらにより、洪水・地震に対する河川堤防のロバスト性評価へつなげる成果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在まで、河川堤防を含む土構造物の変形を予測する種々の手法の開発が研究・開発されてきた。いずれも土の破壊までを予測することに主眼が置かれてきたが、破壊から破壊後の挙動までを追跡可能な手法には課題が残されていた。地震時や洪水時において、変形を許容しても完全な崩壊には至らない「粘り強さ(ロバスト性)」を評価するためには、破壊後の挙動の解析が重要であり、本研究ではこれを実現する手法を提案した。洪水・地震に対する河川堤防のロバスト性評価手法を構築することで、土構造物の性能設計法の確立という地盤工学における喫緊の分野課題の解決に寄与する成果を得た。

研究成果の概要(英文)：Great earthquakes and floods caused by torrential rains, which have become increasingly severe in recent years, require the performance of river levees in Japan to allow deformation but not entire collapse. This so-called "robustness" in the framework of performance-based design, and is regarded as a principle performance requirement to ensure the safety of structures. In this study, we developed an analysis method that can predict the progressive deformation and collapse process (robustness) of river levees due to seismic motion, overflow and seepage flow. We also proposed a method to quantify the prediction accuracy of the proposed method through V&V (verification and validation). These results lead to the evaluation of the robustness of river embankments against floods and earthquakes.

研究分野：地盤工学

キーワード：堤防 ロバスト性 表面侵食 浸透流 地震動 検証

## 1. 研究開始当初の背景

地震に加え近年激甚化する豪雨による洪水に対して、我が国の河川堤防には変形を許容しても決壊には至らない性能が求められている。このいわゆる「粘り強さ」は、性能設計の枠組みでは「ロバスト性」として、構造物の安全性確保のための原則的な要求性能と位置付けられている。

## 2. 研究の目的

本研究では、1) 地震動及び越流・浸透流による堤防の進行的な変形・破壊過程（粘り）を予測可能な解析手法を開発すると共に、2) V&Vを通して提案手法の予測精度を定量化することで、洪水・地震に対する河川堤防のロバスト性評価手法を構築し、土構造物の性能設計法の確立という地盤工学における喫緊の分野課題の解決に寄与することを目的とする。

## 3. 研究の方法

上記の背景から、洪水・地震に対する堤防のロバスト性の評価には、越流侵食、浸透、地震外力を受ける堤防の破壊に至るまでの変形プロセスを精緻に予測可能な解析手法が必要である。さらに、実用化のためには解析手法の予測精度を定量的に示す事が肝要である。本研究ではこれらを課題に、最終的には堤防のロバスト性照査方法を提案することを加え、以下の点について研究を実施する。

- A. 表面流・浸透流及び土の変形・侵食の同時解析手法の開発
- B. 表面侵食のメカニズム解明とモデル化による侵食予測精度の高度化
- C. 提案手法の検証 (Verification) と予測精度の定量化 (Validation)
- D. 性能設計における堤防のロバスト性照査方法の提案

## 4. 研究成果

### A. 表面流・浸透流及び土の変形・侵食の同時解析手法の開発

洪水時には、越流による堤防の崩壊が頻繁に発生し、集落や環境に深刻な被害をもたらす。リスク管理のためには、堤防決壊のメカニズムを理解し、そのプロセスを正確に予測することが非常に重要である。本研究では、堤防決壊時の越流と浸透の両方をシミュレーションするための3次元数値モデルを開発した。自由水の流れを記述する支配方程式を拡張し、多孔質媒体を介した浸透のシミュレーションにも適用した。堤防破堤時の河床変形のシミュレーションには、非平衡土砂輸送モデルを用いた。まず、モデルの流れの部分を検証するために、固体の堤防上の流れに数値モデルを適用し、次に、堤防の破断をベッドの変形モデルも含めてシミュレーションした(図-1)。実験結果との比較により、開発したモデルは越流と堤防決壊のプロセスを合理的に再現することが示された<sup>1)</sup>。さらに、本解析手法を土の大変形解析法である Material Point Method と連成し、表面流・浸透流及び土の変形・侵食の同時解析手法を構築し、浸透による土の変形のシミュレーションに成功した<sup>2)</sup>。

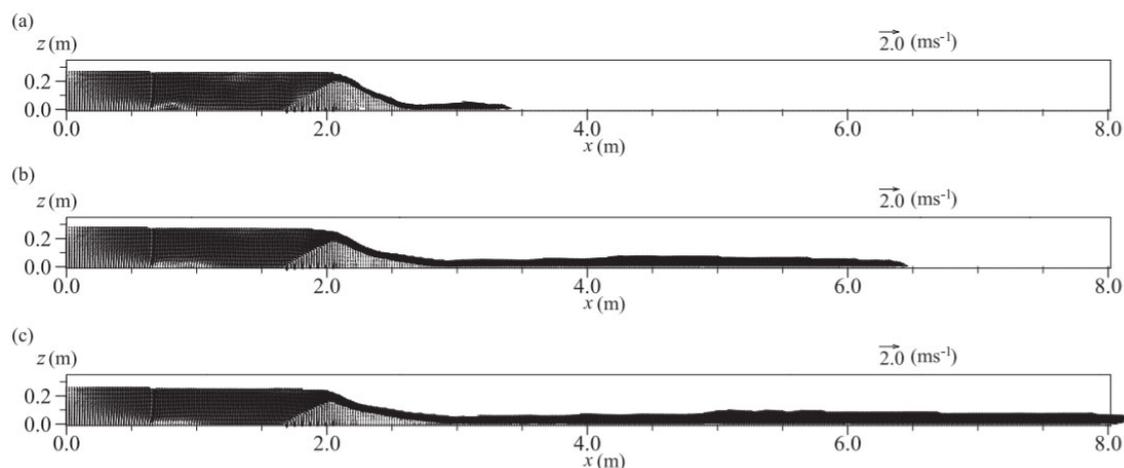


図-1 表面流・浸透流及び表面侵食の同時解結果<sup>1)</sup>

## B. 表面侵食のメカニズム解明とモデル化による侵食予測精度の高度化

河川堤防の越流破堤の主要因である表面流による侵食挙動は、その力学挙動の解明と精緻なモデル化が重要である。本研究では、水路模型を用いた表面侵食実験を実施し、ハイスピードカメラと画像解析により、表面侵食挙動を表面流に起因したせん断力による土のせん断破壊挙動として観察した（図-2）。画像解析には画像相関法を適用して変位場を得ると共に、せん断ひずみ場を定量化した。その結果、粘着性土においては、局部的にせん断ひずみの集中する破壊面を伴い、土魁となって侵食が起こっていることを明らかにした。さらに、このような粘着性土の表面侵食挙動は、表面土の応力状態と Mohr-Coulomb の破壊規準に基づいて土のせん断破壊として説明し得ることを示した。これは、土の構成式によって表面侵食を解析可能であることを示唆している。

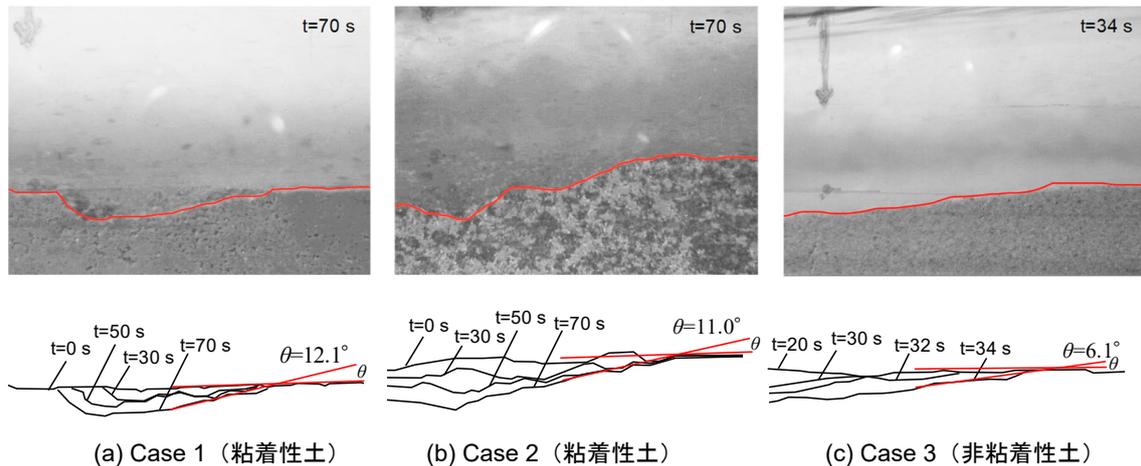


図-2 侵食過程のハイスピードカメラ画像および地盤表面のスケッチ<sup>3)</sup>

## C. 提案手法の検証 (Verification) と予測精度の定量化 (Validation)

V&V によって A. で構築した解析手法のパフォーマンスを示した。提案手法の検証では、土の変形についての理論解との一致から、定式化の理論的正当性を示した。水の流れについては、検証に用いる理論解を得る課題が残った。実験結果との比較による Validation では、地震については液状化を伴う堤防の変形・破壊、洪水については越流侵食・浸透による変形・破壊の予測精度（図-3）を検証した。

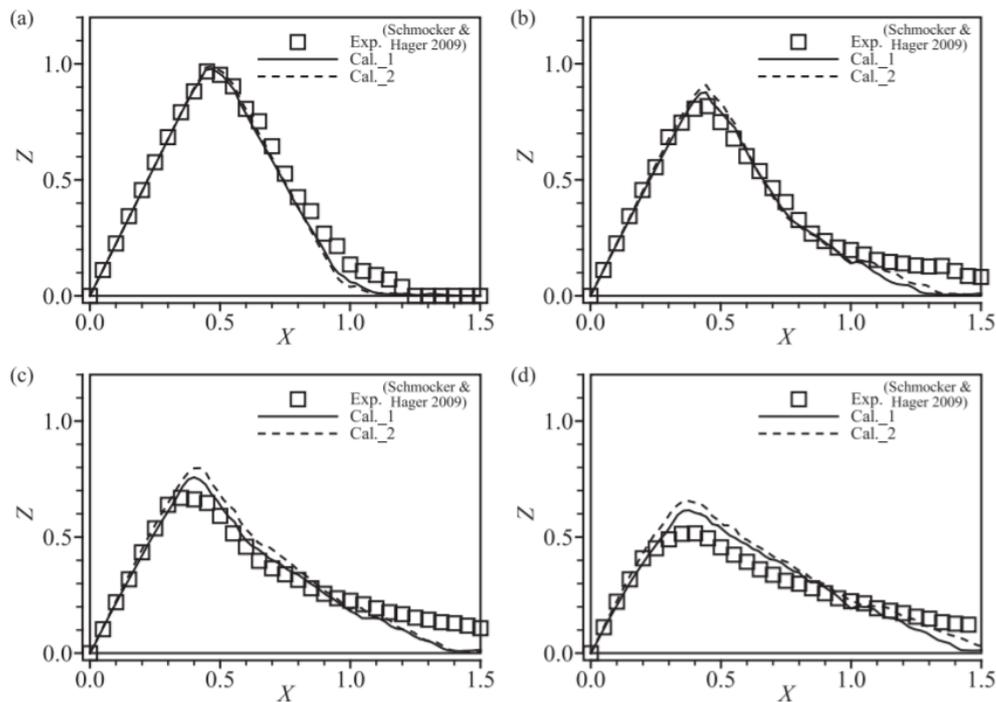


図-3 侵食過程のシミュレーション結果と実験結果の比較<sup>1)</sup>

#### D. 性能設計における堤防のロバスト性照査方法の提案

偶発荷重時における土構造物のロバスト性やレジリエンス性を評価し、意思決定に導くための枠組みづくりを目的としている。その一環として、本研究では、計算コストが大きい高度な数値解析の代替モデルの構築方法とそれを用いた信頼性解析法を提案した。ここでは、数値解析の時系列結果（応答値）のモード分解により時空間の特徴を縮約することで、土構造物の時空間の特徴を有した代替モデルを提案した。さらに、多数の入力パラメータの設定精度の定量化とそれを考慮した新しい信頼性解析法を提案した（図-4）。最後に、液状化対象層上の盛土変形解析の例題を取り上げ（図-5），提案する解析法の具体的な手順を提示するとともに、その有用性について考察した。

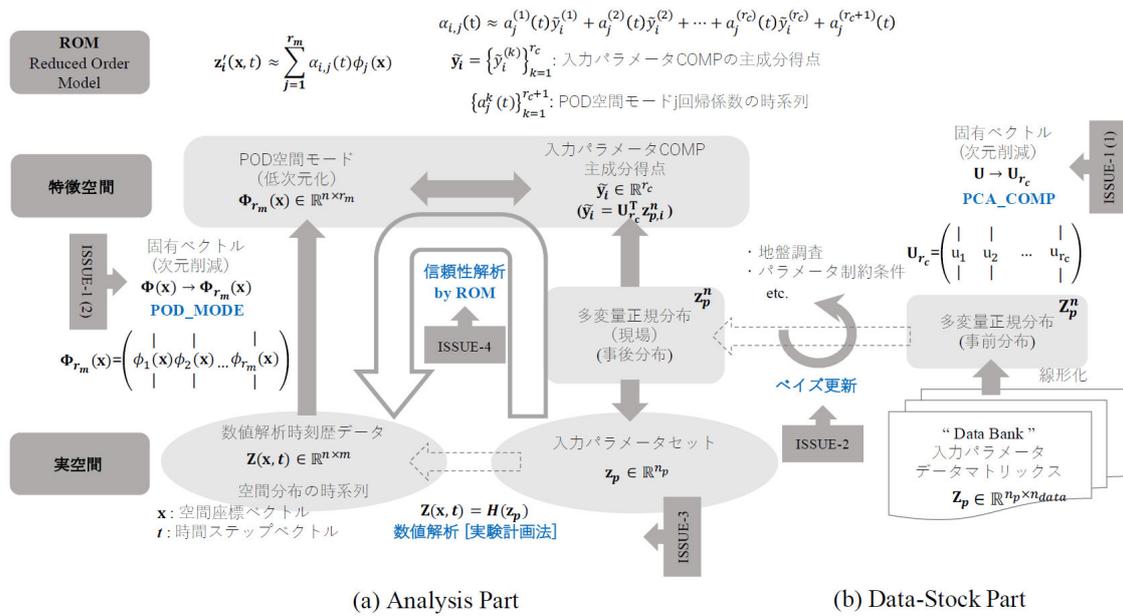


図-4 代替解析を用いた信頼性解析手法の枠組み<sup>4)</sup>

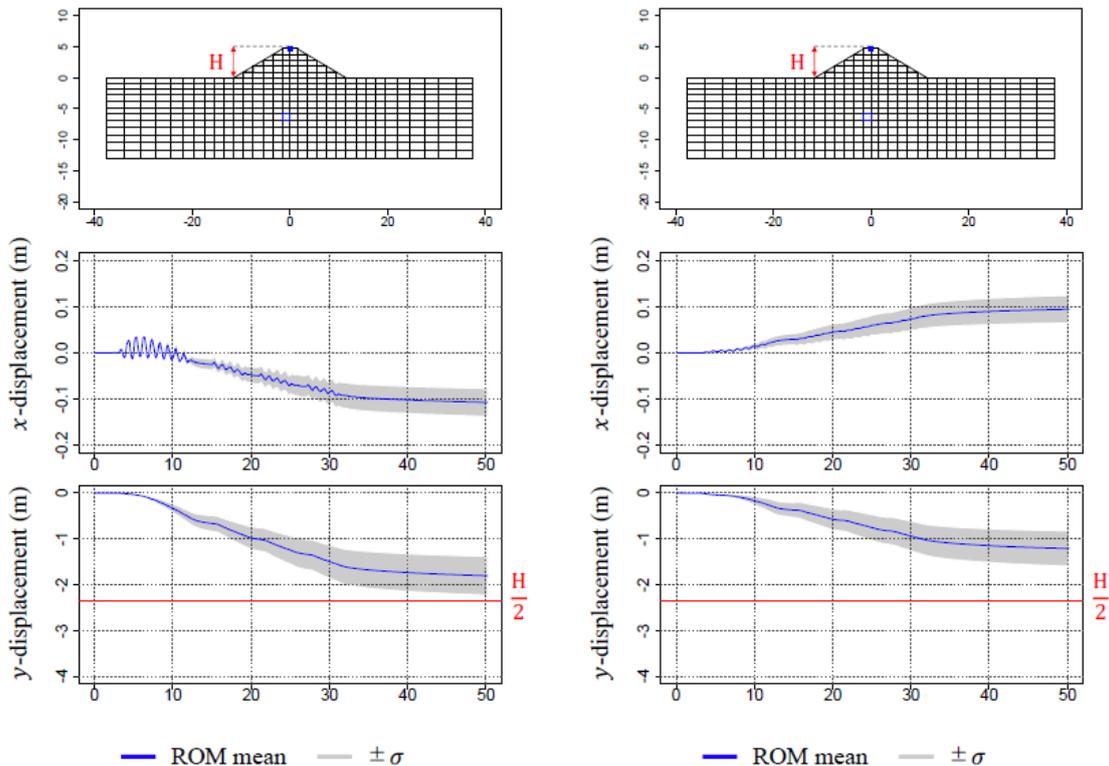


図-5 代替解析を用いた材料の不確実性による解析結果の変動幅の定量化<sup>4)</sup>

参考文献

- 1) Onda, S., Hosoda, T., Jacimovic, N.M., and Kimura, I., Numerical modelling of simultaneous overtopping and seepage flows with application to dike breaching, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.57, No.1, pp.13-25, 2019. DOI:10.1080/00221686.2018.1442882
- 2) 木本康太, 音田慎一郎, 肥後陽介, 水の浸透に伴う堤防裏法のすべり挙動に関する数値シミュレーション, (公社) 土木学会 第 23 回応用力学シンポジウム講演概要集, SS2-01, 2020.
- 3) 肥後陽介, 音田慎一郎, 高野大樹, 山内敏貴, 表面流による土のせん断破壊挙動としての表面侵食の解釈, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.74, No.5, pp. I\_901- I\_906, 2018. [https://doi.org/10.2208/jscejhe.74.5\\_I\\_901](https://doi.org/10.2208/jscejhe.74.5_I_901)
- 4) 大竹雄, 茂野恭平, 渡邊慎也, 肥後陽介, 村松正吾, モード分解を用いた時空間の特徴抽出に基づくデータ駆動型・動的信頼性解析法: 有効応力動的解析への適用, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.76, No.2, pp.142-157, 2020, [https://doi.org/10.2208/jscejge.76.2\\_142](https://doi.org/10.2208/jscejge.76.2_142).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 5件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 大竹 雄、茂野 恭平、渡邊 慎也、肥後 陽介、村松 正吾	4. 巻 76
2. 論文標題 モード分解を用いた時空間の特徴抽出に基づくデータ駆動型・動的信頼性解析法:有効応力動的解析への適用	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集C (地圏工学)	6. 最初と最後の頁 142 ~ 157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejge.76.2_142	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 岩崎理樹、井上卓也、音田慎一郎、矢部浩規	4. 巻 75
2. 論文標題 三次元反砂堆に関する数値計算	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2 (水工学)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 HIGO Yosuke, ONDA Shinichiro, TAKANO Daiki, YAMAUCHI Toshiki	4. 巻 74
2. 論文標題 INTERPRETATION OF SURFACE EROSION AS SHEAR FAILURE OF SOIL CAUSED BY SURFACE FLOW	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_901 ~ I_906
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.74.5_I_901	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 TAKANO Daiki, TAKAHASHI Hidenori, KOIZUMI Katsuhiko	4. 巻 74
2. 論文標題 CENTRIFUGE MODELING OF SEISMIC PERFORMANCE OF GRAVITY-TYPE QUAY WALL WITH IMPROVED BACKFILL	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B3 (Ocean Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_850 ~ I_855
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejoe.74.I_850	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 ONDA Shinichiro, YASUBA Masaharu, HOSODA Takashi	4. 巻 74
2. 論文標題 3D NUMERICAL SIMULATION OF ALTERNATE BAR FORMATION AND RIVER CHANNEL PROCESS WITH BANK EROSION	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_991 ~ I_996
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.74.5_I_991	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shinichiro Onda, Takashi Hosoda, Nenad M. Jacimovic, Ichiro Kimura	4. 巻 Vol.57, No.1
2. 論文標題 Numerical modelling of simultaneous overtopping and seepage flows with application to dike breaching	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Hydraulic Research	6. 最初と最後の頁 pp.13-25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/00221686.2018.1442882	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 肥後陽介, 音田慎一郎, 高野大樹, 山内敏貴	4. 巻 74(5)
2. 論文標題 表面流による土のせん断破壊挙動としての表面侵食の解釈	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1(水工学)	6. 最初と最後の頁 901-906
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件(うち招待講演 0件/うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Yu Otake, Yosuke Higo, Kyohei Shigeno, and Shinya Watanabe
2. 発表標題 Validation of Numerical Analysis Based on Mode Decomposition
3. 学会等名 Proceedings of the 7th International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山内敏貴, 肥後陽介, 高野大樹, 音田慎一郎
2. 発表標題 水路模型実験における土の表面侵食挙動の画像解析による観察
3. 学会等名 第53回地盤工学会研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 竹内智昭, 肥後陽介, 桐山貴俊
2. 発表標題 微小変形及び有限変形問題に対する多相連成GIMP法の検証
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Otake, Shinya Watanabe
2. 発表標題 Reliability Assessment for Pile Foundations Using Construction Information Based on Incomplete Data
3. 学会等名 Proc. of 6th International Symposium on Reliability Engineering and Risk Man-agement (6ISRERM)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroto Koide, Yu Otake
2. 発表標題 Characterizaion of Epistemic Uncertainty in River Dike Risk Assessment consid-ering Spatial Distribuion of Soil Layer
3. 学会等名 Proc. of 6th International Symposium on Reliability Engineering and Risk Man-agement (6ISRERM)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takano, D., Morikawa, Y., Miyata, Y., Nonoyama, H., Bathurst, R.J.
2. 発表標題 Physical modelling of compaction grouting injection using a transparent soil
3. 学会等名 Physical Modelling in Geotechnics
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 音田慎一郎, 安庭正晴, 細田 尚
2. 発表標題 河岸侵食を伴う流路変動過程に関する数値シミュレーション
3. 学会等名 第32回数値流体力学シンポジウム講演論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山内敏貴, 肥後陽介, 高野大樹, 音田慎一郎
2. 発表標題 水路模型実験における土の表面侵食挙動の画像解析による観察
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 茂野恭平, 大竹雄, 肥後陽介
2. 発表標題 数値解析のデータ駆動型検証方法 - 動的有効応力解析への適用 -
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水皓一, 音田慎一郎, 肥後陽介, 細田尚
2. 発表標題 粘着性を有する堤防の侵食挙動に関する実験的研究
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	音田 慎一郎  (Onda Shinichiro)  (50402970)	京都大学・工学研究科・准教授   (14301)	
研究分担者	高野 大樹  (Takano Daiki)  (80626218)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・港湾空港技術研究所・主任研究官   (82627)	
研究分担者	大竹 雄  (Otake Yu)  (90598822)	新潟大学・自然科学系・准教授   (13101)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------