

令和 3 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01532

研究課題名（和文）施工中・供用中の地盤構造物の性能評価手法の開発

研究課題名（英文）Development of Performance Evaluation Method for Geotechnical Structures under Construction and in Service

研究代表者

大竹 雄 (Yu, Otake)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：90598822

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,600,000 円

研究成果の概要（和文）：（1）欧米における実態調査と情報収集：設計基準類だけでなく、リスクアセスメントに関する基準類を広く収集するとともに、ベイズモデリング等を用いた情報更新にかかわる既往研究を広く収集した。（2）個別施設向け性能評価法（詳細法）/施設群向け性能評価法（簡易法）の開発：詳細法については、多次元情報のデータ解析法の開発を行った。施工時情報等、多様な調査間隔、観測精度の異なる情報の相互関係を考慮するモデリング手法を開発した。簡易法では、危険箇所の抽出、レイティングのための簡易な部分係数設定方法を開発した。（3）実データによる事例研究の実装：3事例について、実データの収集整理に基づいた事例研究を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

不確実性の定量化に基づく、信頼性設計法は、国内外の土木分野の構造物設計に採用されるようになってきている。また、この設計法は、施設管理者が所有している多様なデータベースを設計へ活かすためのプラットフォームになると考えられる。この研究では、次期設計基準改定へ貢献するために、施工時やその後現場で観測される様々な情報による信頼性更新とそれを設計基準へ活かすための手法を開発した。多様な意思決定を可能とし、施設の性能設計を真に実現するための基本的な枠組みを提示することができた。

研究成果の概要（英文）：(1) Survey of the actual situation and collection of information in Europe and the U.S.: We collected design standards and a wide range of standards related to risk assessment and existing studies on information updating using Bayesian modeling. (2) Development of performance evaluation methods for individual facilities (detailed method) and for groups of facilities (simplified method): For the detailed method, a data analysis method for multidimensional information was developed. For the detailed method, we developed a method for analyzing multidimensional data (including missing data). We developed a spatial distribution modeling method that can take into account the interrelationship of information at various survey intervals and with different observation accuracy, such as information at the time of construction. (3) Implementation of case studies using actual data: Case studies based on the collection and organization of actual data were conducted for three cases.

研究分野：設計論，信頼性工学，地盤工学

キーワード：信頼性設計 ベイズモデリング スパースモデリング 施工時情報 リスクアセスメント

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

国内外の主要な構造物設計の基準類は、レベル I 信頼性設計法と称される部分係数フォーマットに基づいて記述され、定着している。そして、構造物設計は次のステージに入り、多様な設計概念が提案され、活発な研究開発や議論が行われている。

例えば、米国では、既設橋梁の交通量を観測することや、構造物の目視点検結果を用いた信頼性の現場更新に基づくレイティング (LRFR; Load and Resistance Factor Rating) が実用化され、対策優先度の設定や予算配分の議論に活用されている。一方、2015年に改定された ISO2394:2015 は、信頼性設計からリスク情報を活用した設計へ設計の概念を拡張することにより、新設や既設の区別によらない、また、多様な意思決定を支援する、より汎用的な枠組みを提示している。加えて、データサイエンス技術の急速な発展は、構造物設計の可能性を広げており、大きな変化の時期を迎えていると考えられる。

以上を踏まえて、本研究は、(1) 大きなばらつきを有し、(2) 不均質に空間分布し、(3) その中身を直接見ることができない、地盤材料を用いた構造物設計の次世代型信頼性設計を構築するための、情報収集と手法体系の構築を目指した。

### 2. 研究の目的

施工中や供用中に追加される情報（追加調査、構造物点検・検査、災害時の変状や痕跡など）に基づいて、新設設計時に想定されていた不確実性を継続的に低減させることにより、構造物の信頼性を更新・向上させ、多様性のある効果的な意思決定を支援する方法の提案を目指した。具体的には、(1) 欧米における実態調査と情報収集、(2) 個別施設向け性能評価法（詳細法）／施設群向け性能評価法（簡易法）の開発、(3) 実データによる事例研究の実装、の3つの視点から研究を実施した。

### 3. 研究の方法

(1) 欧米における実態調査と情報収集：設計基準類だけでなく、リスクアセスメントに関する基準類を広く収集するとともに、バイズモデリング等を用いた情報更新にかかわる既往研究を広く収集した。コロナ感染拡大の影響を受けて、研究期間後半の国際会議等への参加は困難となったが、ウェブ会議システム等を活用して、国際的動向について情報収集した。

(2) 個別施設向け性能評価法（詳細法）／施設群向け性能評価法（簡易法）の開発：詳細法については、多次元情報（欠損データを含む）のデータ解析法の開発を行った。施工時情報等、多様な調査間隔、観測精度の異なる情報の相互関係を考慮しうる空間分布モデリング手法を開発した。簡易法では、危険箇所の抽出、レイティングのための簡易な部分係数設定方法を開発した。

(3) 実データによる事例研究の実装：以下3つの事例について、実データの収集整理に基づいた事例研究を実施した。「大規模半地下道路200mを対象として、仮設土留め変位観測に基づく動態観測法の開発と検証」「一級河川堤防30kmを対象として、過去の被災事例（漏水等）を考慮したレイティング手法の開発と検証」「杭基礎施工中の施工時情報を活用したリアルタイム支持力空間分布推定方法の開発と検証」

#### 4. 研究成果

欧米の設計基準の動向を広範に調査し、我が国の地盤構造物設計における具体的課題を整理した。その結果は、これ以降示す、具体的な事例研究の基礎資料とした。加えて、文献(1),(2)には、広域の調査結果と実用化へ向けての具体的な課題を取りまとめた。オランダ国が実施している、全国規模の河川流域リスクアセスメントやそれに基づく目標信頼性の設定方法、中小規模の災害痕跡を用いた信頼性更新等、信頼性更新理論が活用されている現状を紹介している。研究者、技術者へ広く情報を共有することができた。

(1) 仮設土留めの動態観測法：大規模半地下道路200mを対象として、仮設土留め変位観測に基づく動態観測法の開発と検証をおこなった。画像の復元等に用いられる“超解像技術”の応用により、大規模な土留め工の掘削過程で観測される、壁の変位からの逆解析により、安全な施工管理のためのリアルタイムシステムを構築した。動態観測を有効に機能させるための最適な観測点網の設計と、観測に基づく信頼性更新、次ステップの状態予測を効果的に行う枠組みを提案している（成果の一部は文献(3)で公表されている）。

図1は、超解像技術に基づく、土留め壁の変位推定結果を示している。画像解析分野で行われる、辞書学習の考え方を援用している。辞書学習には、K-SVDを用い、スパースモデリングにより、極めて少ない基底から予測を行う方法を提案している。なお、地盤パラメータの逆推定、観測点の最適化について研究成果が得られており、今後順次公表する予定である。

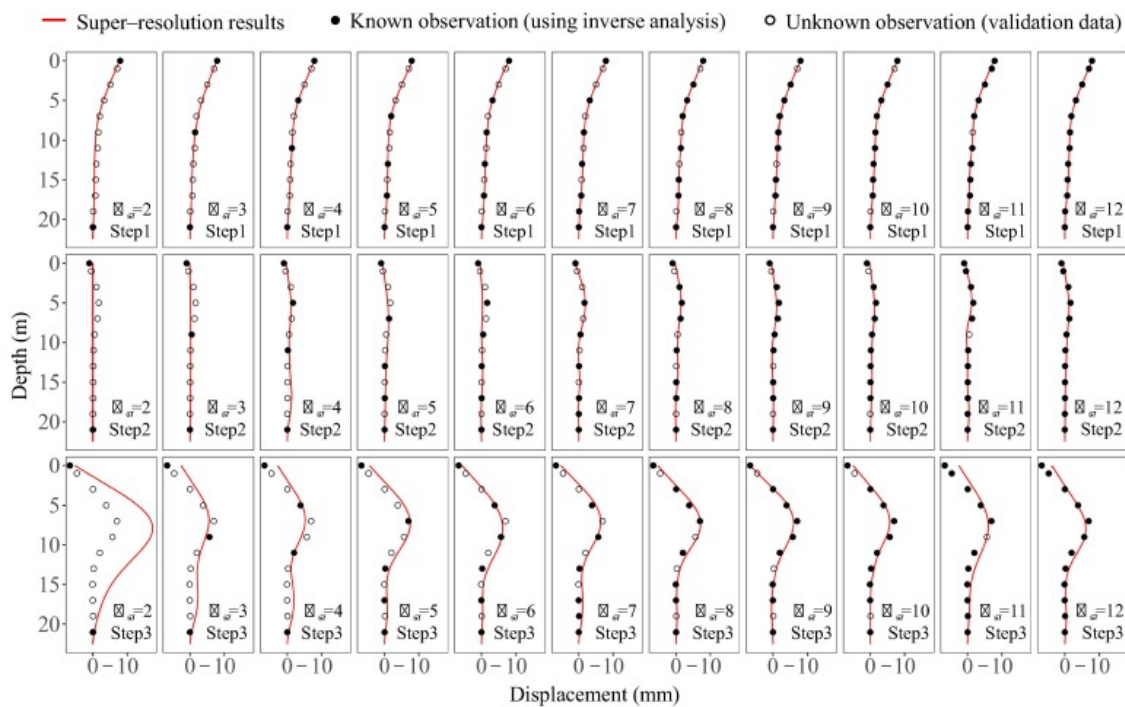


図1 超解像技術を援用した土留め壁の内挿推定結果（黒点が観測、赤線が超解像結果、白点が予測点の真値）

(2) 河川堤防の線状リスク評価：一級河川堤防30kmを対象として、過去の被災事例（漏水等）を考慮したレイティング手法の開発と検証を行った。河川堤防は、大規模な線状構造物であり、堤防の中身を全域で把握することは不可能である。一方で、河川堤防は、リダンダンシーに乏しい直列システムであり、局所的に破壊が生じた場合にも河川堤防の性能を維持することは

できない。この問題に対して、オランダ国の河川堤防リスクアセスメントに用いられている信頼性更新方法を適用して、日本の河川堤防に適したモデルへ改良した。彼らは、過去の洪水後の目視点検情報（法崩れ、漏水、噴砂、パイピング、変状なし等の定性的情報であり、これらを彼らは”survival information”と呼称している）に基づいて、線状の河川堤防リスクを定量化し、危険箇所を抽出できることを示した。加えて、信頼性解析を実施した断面（赤点）の効果的な補間方法を開発した（文献(4)）。薄い青点は真値で、離散的な赤点の計算結果をローカルレベルモデルに線形予測子の回帰分析を導入したモデル（最下段）により、点を線につなぐ方法を提案した。線形予測子の説明変数は、微地形分類情報や、過去の被災履歴、堤防の形状等、全ての区間で得られる情報により、補正することで、複雑な空間分布推定を可能としている。

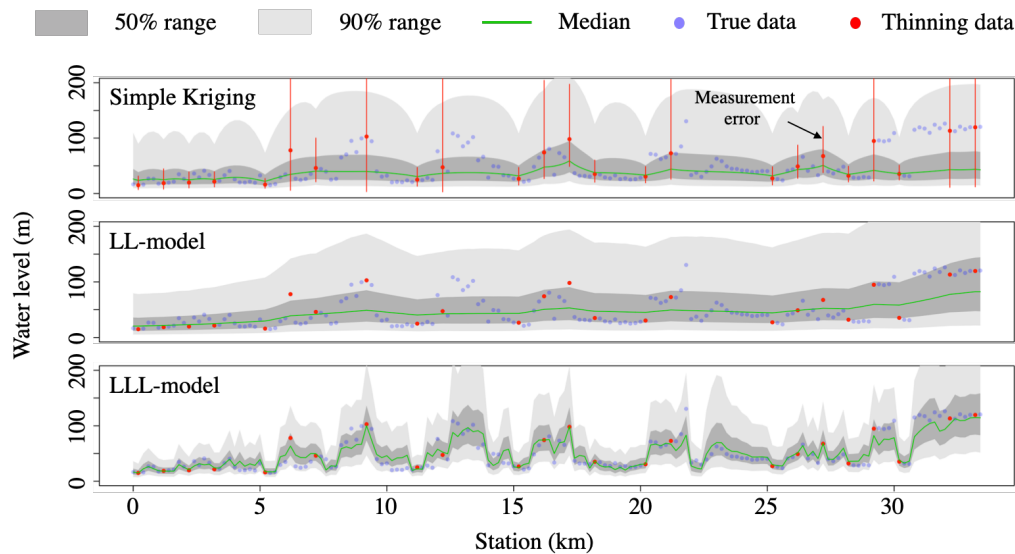


図2 ローカルレベル回帰モデルを用いた信頼性の内挿補間結果

(3) 杭施工中の施工時情報を活用したリアルタイム予測：杭基礎施工中の施工時情報を活用したリアルタイム支持力空間分布推定方法の開発と検証を実施した。鋼管を回転しながら打設する際、トルク値、1回転あたりの貫入量、貫入時の上載荷重等の情報を深度方向に連続的に得ることができる。これらのデータの統計解析に基づいて、周面支持力をリアルタイムに推定する方法を提案している（図3）周面支持力の推定式を多変量正規分布における条件付き分布とみなして、事前に学習しておいた、周面支持力と地盤調査結果と施工時情報の相関構造を活用して、リアルタイムに推定式を見直すことにより、現場の特徴を反映した支持力推定を可能とした（文献(5)）。また、文献(6)は、GPR（ガウシアンプロセス）を地盤特性の空間分布のトレンド成分とランダム成分の分離を客観的に行う手法を提案している。今後の空間分布の多様なモデリングや他指標間の相関を考慮した空間分布推定への拡張を進める予定である。

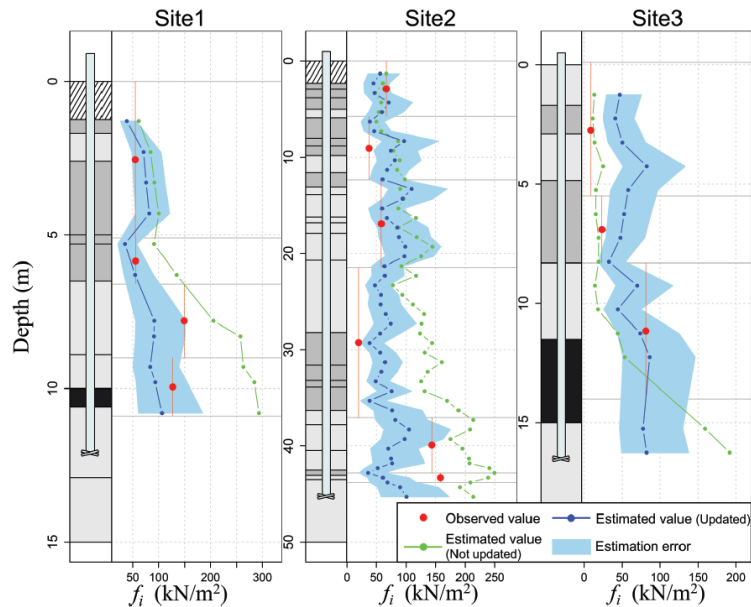


図3 施工時情報を活用したリアルタイム支持力推定シミュレーションの例. 赤点が載荷試験結果（真値）で青線がリアルタイム予測の期待値を示す.

#### 引用文献

- (1)大竹雄：地盤材料物性・地盤挙動の不確実性への対応-施工時や供用時の逐次信頼性更新に基づく新しい地盤構造物設計-, 地盤工学会誌 (Accepted)
- (2)Otake, Y. and Honjo, Y.: Challenges in Geotechnical Design revealed by Reliability Assessment: Review and Future Perspectives, Soils and Foundations, (Submitted.)
- (3) Otake, Y. and Kodama, S. and Watanabe, S.: Improvement in the information-oriented construction of temporary soil-retaining walls using sparse modeling, *Underground Space*, 4, 3, 2019, 210-224.
- (4) Hiroto Koide and Yu Otake: Modeling of Spatial Distribution of the Piping Hazard for River Dikes Based on Actual Data, *Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR2019)*, 2019, 285-290.
- (5) Otake, Y., Watanabe, S., and Mizutani, T.: Improvement of side resistance prediction for pile foundation using construction information., *Canadian Geotechnical Journal*, 58, 4, 2021, 496-513
- (6) Yoshida, I., Tomizawa, Y., and Otake, Y.: Estimation of trend and random components of conditional random field using gaussian process regression., *Computers and Geotechnics*, (Accepted)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yu Otake, Shinnosuke Kodama, Shinya Watanabe	4. 巻 4
2. 論文標題 Improvement in the information-oriented construction of temporary soil-retaining walls using sparse modeling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Underground Space	6. 最初と最後の頁 210-224
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 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 Masahiro Takenobu, Masafumi Miyata, Yu Otake & Takehiko Sato	4. 巻 13
2. 論文標題 A basic study on the application of LRFD in "the technical standard for port and harbour facilities in Japan": a case of gravity type quay wall in a persistent design situation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards	6. 最初と最後の頁 195-204
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 北澤周作, 大竹雄, 兵頭武志, 林田秀樹, 本城勇介	4. 巻 75
2. 論文標題 目視点検データの統計解析に基づくRC床版を有する港湾棧橋構造物の劣化要因分析	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集A1(構造・地震工学)	6. 最初と最後の頁 311-319
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 Yo Fukutani, Shuji Moriguchi, Kenjiro Terada, Takuma Kotani, Yu Otake, and Toshikazu Kitano	4. 巻 19
2. 論文標題 Tsunami hazard and risk assessment for multiple buildings by considering the spatial correlation of wave height using copulas	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Natural Hazards and Earth System Sciences	6. 最初と最後の頁 2619-2634
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 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) 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 外里健太, 小谷拓磨, 波多野僚, 高瀬慎介, 森口周二, 寺田賢二郎, 大竹雄	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 数値解析結果の空間モード分解による津波のリスク評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本計算工学会論文集	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 Yu Otake, Shinya Watanabe and Taisaku mizutani	4. 巻 Accepted
2. 論文標題 Improvement of side resistance prediction for pile foundation using construction information	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Canadian Geotechnical Journal	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 吉田郁政, 田崎陽介, 児玉真乃介, 大竹雄	4. 巻 73
2. 論文標題 スパースモデリングの基本的考え方と土木工学への適用に関する基礎研究	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2(応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_507-I_516
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 上原直秀, 橘一光, 菅野蓮華, 森口周二, 寺田賢二郎, 高瀬慎介, 大竹雄	4. 巻 73
2. 論文標題 個別要素法を用いた落石解析における斜面物性の空間分布の影響	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2(応用力学)	6. 最初と最後の頁 I_791-I_799
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 深田竜司, 肥後陽介, 大竹雄, 南野佑貴, 加藤亮輔	4. 巻 73
2. 論文標題 盛土内の不均質透水性空間分布の生成と不飽和降雨浸透解析への適用	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 土木学会論文集A2(応用力学)	6. 最初と最後の頁 pp. I_791-I_799
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 Ikumasa Yoshida, Yosuke Tasaki, Yu Otake and Stephen Wu	4. 巻 Vol.4
2. 論文標題 Optimal Sampling Placement in a Gaussian Random Field Based on Value of Information	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems	6. 最初と最後の頁 11
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8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Yuhei Kaneko, Shogo Muramatsu, Hiroyasu Yasuda, Kiyoshi Hayasaka, Yu Otake, Shunsuke Ono, Masahiro Yukawa
2. 発表標題 Convolutional-Sparse-Coded Dynamic Mode Decomposition and Its Application to River State Estimation
3. 学会等名 Proc. Of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Yusuke Honjo and Yu Otake
2. 発表標題 Normative Statistical Solutions for Common Geotechnical Problems
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 Masahiro Takenobu, Masafumi Miyata, Hideki Kawamata, Hiroaki Matsubara, Yoichi Watabe, and Yu Otake
2. 発表標題 A Basic Study on Reliability Analysis Method for Circular Slip Failure Considered with the Determination Method of the Characteristic Value of Soil Property in Technical Standard for Port in Japan
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 Hiroto Koide and Yu Otake
2. 発表標題 Modeling of Spatial Distribution of the Piping Hazard for River Dikes Based on Actual Data
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 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 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) (国際学会)
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) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kotani, S. Moriguchi, K. Terada, S. Takase, Y. Otake, Y. Fukutani, M. Sa-kuraba
2. 発表標題 A Tsunami Risk Analysis Considering Correlations Among Coastal Cities
3. 学会等名 Proc. 7th Asia Conference on Earthquake Engineering, CD-ROM(8 pages), 2018. (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 本城 勇介・大竹雄	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技報堂出版 株式会社	5. 総ページ数 400
3. 書名 信頼性設計法と性能設計の理念と実際：地盤構造物を中心として	

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------