

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：13102

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K21054

研究課題名（和文）次世代の社会基盤構造物の維持管理のための危険度総合評価システムの開発

研究課題名（英文）Development of a comprehensive risk assessment system for the maintenance and management of social infrastructure structures.

研究代表者

中村 文則（Nakamura, Fuminori）

長岡技術科学大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70707786

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、社会基盤構造物に作用する自然環境・大規模災害時の外力の予測技術を利用して、構造物の劣化現象と災害時の危険度を統合して評価できる危険度総合評価システムの開発を行った。その結果、沿岸部のコンクリート構造物の劣化現象とその要因となる自然環境作用（風況、波浪、飛来塩分）を3次元的に予測できるシミュレーションモデルを構築した。さらに、大規模な災害の予測技術の構築として、大気海洋波浪結合モデルと波動解析モデルを組み合わせた予測モデルを構築した。その予測モデルを利用することで、高潮現象によって生じる波浪および海水面上昇とそれに伴う構造物への作用波力の予測が可能であることが示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、これまで国内外で盛んに研究が進められてきたコンクリート構造物内部の劣化予測解析と災害時のコンクリート構造物の破壊予測解析の境界条件を高精度化するものである。これまで注目されていなかった構造物の外部境界条件を高度化することで、災害を含めた外部環境作用を高精度で予測できる技術を構築するものである。将来的には、コンクリート構造物の外部から内部までを統合して構造物の危険度を判定できる技術の構築につながり、社会基盤構造物の設計・維持管理の効率性と安全性を向上させる点に社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In this study, utilizes prediction techniques for external forces acting on social infrastructure structures in the natural environment and during large-scale disasters, the system is capable of evaluating both the deterioration of structures and the degree of danger in the event of a disaster. As a result, a three-dimensional simulation model that can predict the deterioration of concrete structures in coastal areas and the natural environmental effects (wind conditions, waves, and salt introduced by air) that contribute to the deterioration was developed. Furthermore, it was shown that, as a forecasting method for large-scale disasters, a coupled atmosphere-ocean wave model and wave analysis model can be used to predict and analyze waves and sea level rise caused by storm surge events and the resulting wave forces acting on structures.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：維持管理 自然災害 劣化予測 塩害 高潮

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

コンクリート構造物の劣化現象、耐力評価の研究は盛んに進められており、構造物外部および表面の境界条件を与えることで、その内部の挙動を正確に予測できるようになっている。その一方で、その境界条件となる構造物外部の条件については、構造物内部の研究とは別に研究が進められ、外部環境作用を高精度で予測できる技術が確立されている。しかしながら、災害を含めた外部環境作用の予測技術の知見を構造物表面の境界条件として、構造物内部の予測解析に利用している事例はほとんどないのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では、社会基盤構造物に作用する自然環境・大規模災害時の外力の予測技術を利用して、構造物の劣化現象と災害時の危険度を統合して評価できる危険度総合評価システムの開発を行った。構造物外部から内部までを統合して、構造物の危険度を判定できる技術を確認する点に挑戦的研究としての意義がある。

3. 研究の方法

(1) システムの全体構成

危険度総合評価システムは、コンクリート構造物の劣化予測と大規模な災害による構造物への作用外力を予測する解析モデルから構成されている。構造物の劣化予測モデルでは、自然環境作用に応じたコンクリート内部の鉄筋腐食過程の予測を行った。構造物の作用外力の予測モデルでは、台風またはハリケーンによる高潮現象の予測とそれに応じて構造物に作用する波力の予測を行った。

(2) 沿岸部の塩害環境作用の予測と構造物の劣化予測解析

沿岸部に設置されているコンクリート構造物は、海域からの飛来塩分の作用を受けることで、コンクリート内部の鉄筋が腐食する。そのため、構造物外部の風況・波浪・飛来塩分の塩害環境作用を予測できる予測モデルを構築した。

図-1 は構築した自然環境作用の予測モデルの概略図である。図に示すように、予測モデルは、波浪場の空間と大気空間に分かれており、それらを統合して計算を行った。波浪場の空間では、平面的な波の伝播および砕波現象、海水面から発生する飛来塩分量の計算を行った。計算モデルは修正ブシネスク方程式モデルであり、不規則波に対応したモデルを構築した。大気空間では、3次元空間の風況と海水面から発生した飛来塩分の輸送過程と構造物表面への到達過程の計算を行った。コンクリート表面から内部の劣化促進物質の移動は、移流拡散方程式を利用した予測モデルである。

予測解析では、新潟県の沿岸部に位置する名立大橋および青海川橋等の構造物を対象とした。これらの橋梁は、汀線から 50m 程度の位置に橋桁が設置されているコンクリート製の橋梁であり、塩害が問題となっている橋梁である。

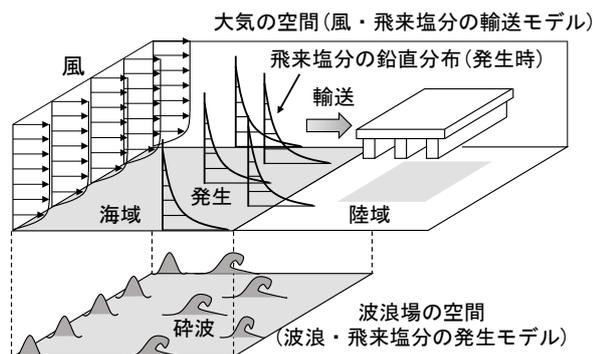


図-1 自然環境作用の予測モデル

(3) 大規模災害(高潮)の予測解析とその構造物への作用外力を統合した予測技術の開発

予測モデルは、沿岸部で発生する高潮現象と橋桁に作用する波力を統合して予測できるものである。計算全体の流れは、沿岸部で発生する高潮現象の予測解析により、風況、波浪、海面上昇量を予測し、その結果を境界条件として橋桁に作用する波圧分布の予測を行うものである。高潮予測解析に利用した予測モデルは、Waner ら(2008)が提案している領域気象モデル WRF、波浪推算モデル SWAN、海洋モデル ROMS を結合させた大気海洋波浪結合モデルを用いた。このモデルは、領域気象モデル、波浪推算モデル、海洋モデルのそれぞれの計算結果を相互に利用して、大気中の風況、海域の波浪、海洋の水位変動などを時系列で計算するものである。領域気象モデル WRF、波浪推算モデル SWAN、海洋モデル ROMS の各プログラムは、オープンソースとして公開されているものを利用した。

高潮発生時の波浪現象と構造物への作用力の予測は、海岸工学分野で実績がある数値波動水槽 CADMAS-SURF3D を使用した。このモデルは、流体の流れを SMAC 法、自由水面を VOF 法で計算することにより、波浪による波圧を予測できるものである。本計算では、高潮予測解析において予測した構造物周辺の水位、波高、周期を波の入射条件として数値波動水槽に設定し、構造物に作用する波圧の計算を行った。入射波は不規則波であり、波高および周期に応じた 100 波の波形を構築し、それを設定した。

計算では、過去に来襲した台風(ハリケーン)によって発生した高潮現象の予測解析を実施し、予測結果と観測結果を比較することでその妥当性の検証を行った。対象とした過去のハリケーンは、2005年8月29日にアメリカに来襲した Katrina である。計算時間は、Katrina が上陸した前後の2005年8月27日0:00~8月31日24:00とした。図-2は、領域気象モデルWRFに設定した計算領域である。図に示すように、計算領域はハリケーンが通過する経路を中心に第1領域を1980km×1710km、第2領域を900km×900kmの範囲とした。波浪推算モデルSWANとROMSの計算領域は、WRFの第2領域内に設定した。

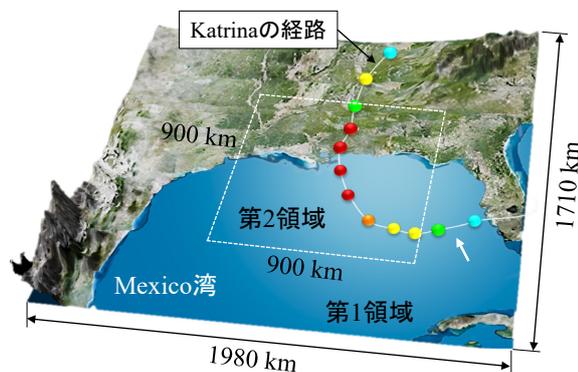


図-2 領域気象モデル WRF の計算領域

対象とした橋梁は、アメリカ南部のミシシッピ州に位置する US-90 Biloxi Bay Bridge である。この橋梁は鉄筋コンクリート製であり、2005年に来襲した Katrina によって大部分の橋桁が落橋する被害が報告されている。橋梁の寸法は橋長 2.7km であり、橋桁は図-3のような桁幅が約 22.0m、桁長 15.8m である。橋桁が水面から 5m 程度の高さに設置されている。計算領域は、図のような長さ 400m、幅 0.2m、高さ 20m であり、幅方向は1格子だけの鉛直2次元的な計算とした。計算格子間隔は、水平方向が 0.2m、鉛直方向が 0.1m である。橋桁に作用する外力は、橋桁表面部の格子に作用する圧力を抽出して算定した。境界条件は、図の左端を造波境界、右端を自由流出境界(開境界)に設定し、右端から 100m の範囲は波の減衰帯を設定した。入射条件は、Katrina によって海水面が上昇した 29日12:00 付近の波浪条件を設定して計算を実施した。

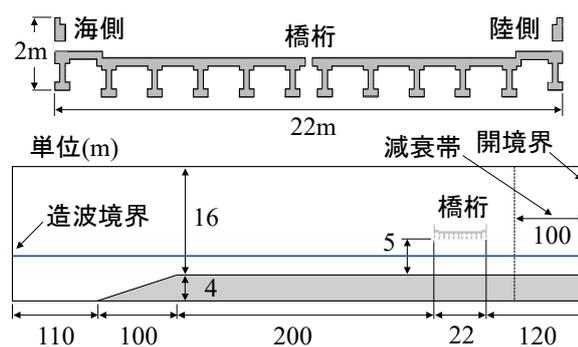


図-3 橋梁に作用する波力の計算領域

4. 研究成果

本研究から以下の成果が得られた。

(1) 沿岸部の塩害環境作用の予測と構造物の劣化予測解析

図-4は、構築した自然環境作用の予測モデルを用いて、構造物周辺の風況・波浪・飛来塩分を予測した計算結果の一例である。図は、汀線位置で飛来塩分の発生量を与え、飛来塩分の定常的な計算を実施した結果である。図の中央の橙色の部分の対象としたコンクリート橋梁である。上図では、図の左側から風が作用している状況であり、汀線位置から発生した飛来塩分が風によって陸側へ輸送されていることがわかる。橋桁背後では、風の乱れとともに、飛来塩分が拡散するような傾向が見られる。

下図は、橋桁側面の飛来塩分の作用状況を示した計算結果である。図より、飛来塩分は、高さが低い位置に集中しており、大部分が橋桁の下部を通過している結果である。これは、飛来塩分が海水面から発生するため、高さが低い位置に大量に分布していることと、対象とした橋梁が地表面から 6~7m 程度の高い位置に設置されているためである。この結果より、橋梁に作用する飛来塩分量は、橋梁表面に一定に作用するのではなく、風および地形条件、構造物の形状・高さによって、3次元的に変化していることがわかる。

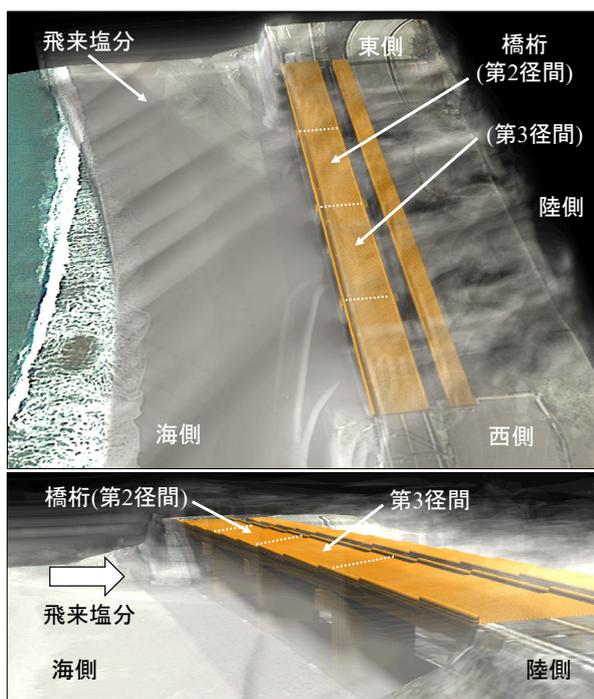


図-4 自然環境作用の計算結果

図-5は、橋桁表面に作用した飛来塩分量の分布を示した計算結果である。図は、橋桁中央部の第2径間の結果である。図に示すように、橋桁表面に作用する飛来塩分は、表面全体で一定ではなく、空間的な差が見られる。橋桁の西側と東側端部の飛来塩分量を比較した場合では、東側の端部で大きくなっている傾向がある。これは、飛来塩分の輸送過程に風況が関係しており、風が東方向に吹き付けるような条件のためである。海側のG5主桁においても、塩分量が大きくなっているが、これは海側から飛来塩分が作用するためである。

以上より、沿岸部のコンクリート構造物の劣化現象とその要因となる自然環境作用(風況、波浪、飛来塩分)を3次元的に予測できるシミュレーションモデルが構築でき、そのモデルが実構造物に適用できることが明らかになった。しかしながら、飛来塩分量と予測結果と実測結果を比較した場合に、一致しない箇所も確認された。実際は、降雨・結露による水分が作用するため、今後、降雨作用の影響を考慮した解析および模型実験によるデータの取得を行う予定である。

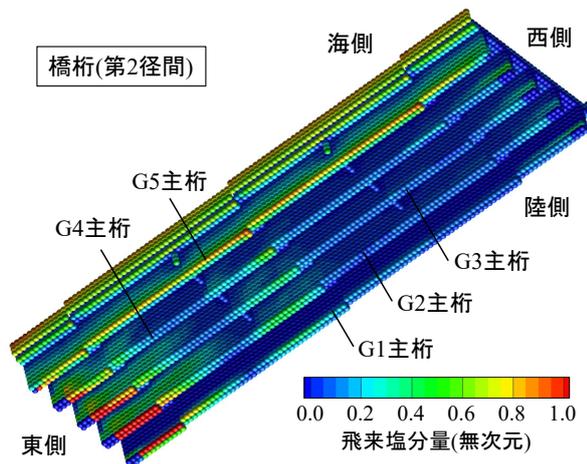


図-5 橋桁表面の作用塩分量の分布

(2) 大規模な高潮現象と構造物に作用する外力の予測解析

2005年8月に来襲したKatrinaを再現した予測解析を実施し、対象としたBiloxi Bay Bridge周辺の風速、波浪、水位の予測結果について検討を行った。図-6は、Katrinaが対象としたBiloxi Bay Bridgeに最も接近した8月29日12:00の風況を再現した計算結果である。図に示すように、29日12:00の時点では、Katrinaはメキシコ湾のミシシッピ州沿岸部に位置しており、陸上へ上陸していることがわかる。Katrinaの中心部付近では、風速が局所的に大きくなっており、風速40m/s以上となっている。Biloxi Bay Bridge周辺では、風は海域から陸域方向へ作用しており、海上の風により、沖海域で波高が増大していると考えられる。

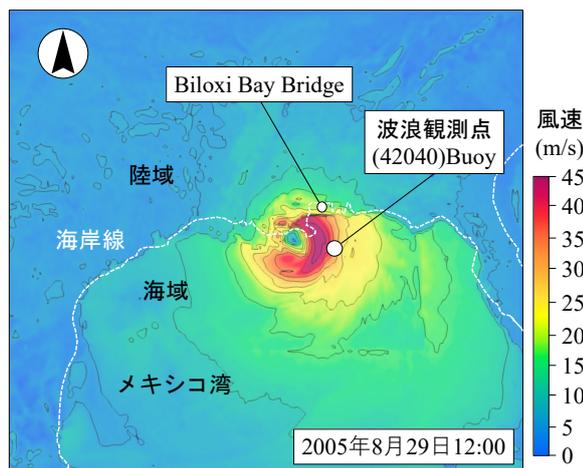


図-6 Katrina 来襲時の風速の計算結果

図-7は、Biloxi Bay Bridge周辺の海域の波高分布を示した結果である。図の波高は、2005年8月29日12:00の波浪推算モデルSWANの計算結果を整理した値である。図より、Biloxi Bay Bridgeの沖海域全体で波高が高くなっており、最大で波高12m程度となっている。Biloxi Bay Bridge近傍の沿岸部では波高が減少しており、波高3m程度であった。これは、Biloxi沿岸部では、海域の水深が浅い部分が広がっており、沖側で増大した波が砕波することにより、沿岸部で減衰したためであると考えられる。

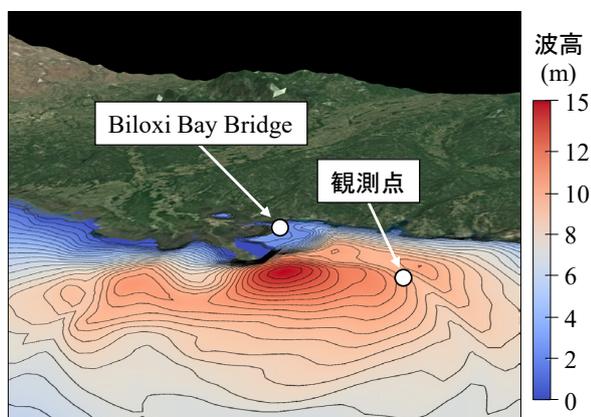


図-7 Biloxi 周辺海域の波高分布

予測解析結果を検証するために、Biloxi Bay Bridge周辺に設置されている観測点の観測結果と予測解析結果の比較を行った。図-8は、風速、波高、海水面水位の時系列分布を示した結果である。図に示すように、各観測結果は、KatrinaがBiloxiに最も接近した8月29日12:00付近で最大値となり、その後、減少している傾向が見られる。上段に示す風速では、8月29日12:00では、観測結果の風速が34.6m/s、予測結果が37.8m/sであり、両者がおおむね一致している結果である。

上段に示す風速では、8月29日12:00では、観測結果の風速が34.6m/s、予測結果が37.8m/sであり、両者がおおむね一致している結果である。

中段に示す波高の時系列分布では、観測結果の最大値(29日 12:00 付近)が波高14.6m、予測解析の結果が10.7mとなっており、予測解析の結果の方が小さい結果となっている。計算結果は、8月27日12時から29日12時付近まで、観測結果と比較して全体的に低い結果となっている。これは、波浪推算モデルの係数の設定値の一部が過小であったためである。今後、係数を修正することで、改善できると考えられる。

下段は、海水面水位の時系列分布を示した観測結果と計算結果である。図に示すように、観測結果は29日12:00付近まで示されているが、これは観測が12:00以降に欠測したためである。観測結果が得られている29日12:00までの水位は、予測結果と観測結果でおおむね一致しており、予測解析では最大水位が6.9m程度であった。最大水位については、観測結果と比較できていないが、予測結果の変動は十分に再現できていると考えられる。

図-9は、数値波動水槽によって橋桁に作用する波の計算結果を示したものである。図は、8月29日12:00時点の結果である。図に示すように、29日12:00では、高潮現象によって海水面が上昇し、橋桁全体が水没している状況であることがわかる。予測結果では、沖側から伝播してきた波が橋桁上を通過しており、波が橋桁に激しく衝突している状況は見られなかった。橋桁に生じる波力は、波の作用に応じて変化する状況であるが、計算結果では静水圧に近い値であった。

一方で、橋桁より水位が低い条件で計算した結果では、波が橋桁の下部に作用し、橋桁を押し上げるような鉛直方向の波力が生じる結果であった。これらの結果から、高潮の発生により海水面が上昇し、波が橋桁の下部に到達するような条件となったときに、橋桁に鉛直的な波力が作用していることがわかった。実際の橋梁では、橋桁の大部分が落橋しており、今回の計算結果と同様の傾向となっている。

以上より、大規模な災害の予測として、高潮現象では、海岸工学分野で使用されている領域気象モデル、波浪推算モデル、海洋モデルを組み合わせた大気海洋波浪結合モデルを利用する方法が有効であることが示された。さらに、その結果を境界条件として波動解析モデルを使用することで、高潮現象によって生じる波浪および海水面の上昇とそれによる構造物への作用波力を予測解析できることが示された。

(3) 構造物の危険度総合評価システムの開発と今後の課題

本研究成果から、構造物の危険度を総合評価できるシステムとして、構造物外部の境界条件(自然環境・災害時外力)を予測する部分を開発できた。しかしながら、構造物外部の境界条件に応じた内部の挙動については、予測解析が可能であることは確認できたが、その結果の妥当性までは十分に明らかにすることができなかった。これは、災害時における実構造物の外部から内部までの破壊過程を網羅したデータがほとんどないことが要因である。そのため、今後、構造物外部と内部の両方のデータを模型実験により測定し、開発したシステムの検証を行う予定である。

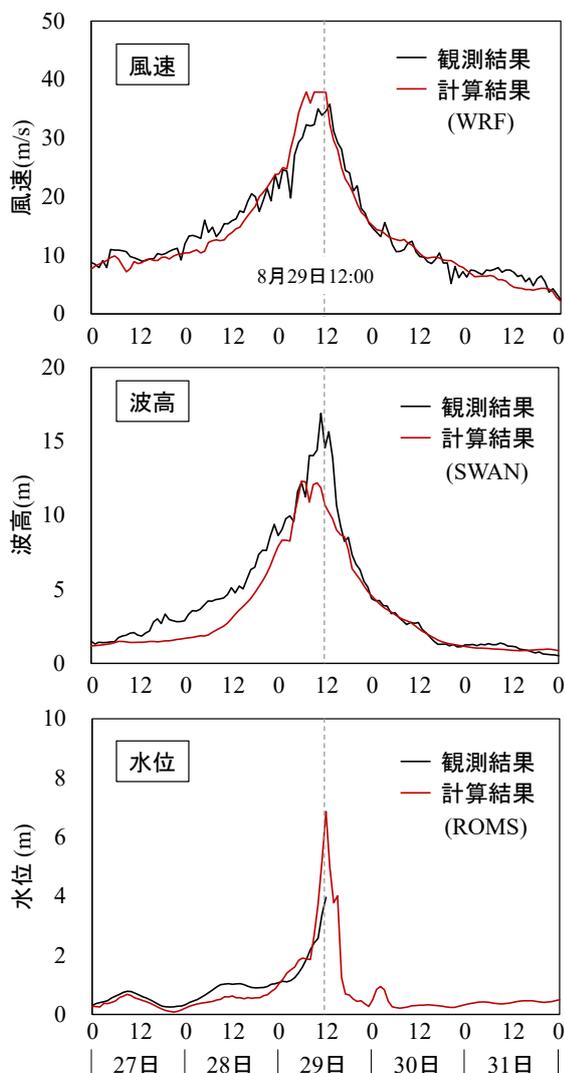


図-8 計算結果と観測結果の比較

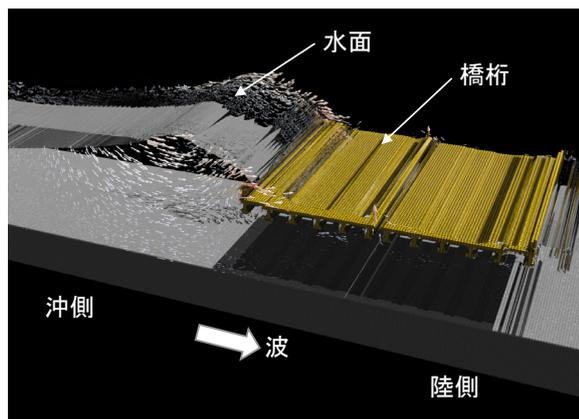


図-9 橋桁に作用する波の状況

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10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 新宮唯史・中村文則・大熊真貴・柿原芳彦	4. 巻 Vol.43
2. 論文標題 降雨と飛来塩分を再現したコンクリート構造物の表面物質量に関する実験	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 520-525
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 請舩 慧・崎原康平・中村文則・滝 勇太	4. 巻 Vol.43
2. 論文標題 長期観測データに基づく沖縄本土島海岸付近の飛来塩分予測における機械学習の適用	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 544-549
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 増田 健・中村文則・山口貴幸・下村 匠	4. 巻 Vol.43
2. 論文標題 3次元仮想空間技術を利用した構造物の維持管理システムの提案とその検証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 907-912
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 請舩 慧・崎原康平・中村文則・富山 潤・滝 勇太	4. 巻 21
2. 論文標題 地域毎の環境作用を考慮した機械学習による飛来塩分予測	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集	6. 最初と最後の頁 301-306
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 中村文則・Chimedtseren Otgonbileg・増田 健・神田佳一・下村 匠	4. 巻 Vol.77
2. 論文標題 北陸・東北地方の日本海沿岸部における飛来塩分の現地観測と環境作用の影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集B2(海岸工学)	6. 最初と最後の頁 I_445-I_450
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 中村文則・山科裕海・井向日向・山口貴幸・下村 匠	4. 巻 21
2. 論文標題 構造物外部から表面部における降雨・飛来塩分の移動過程の予測解析とその検証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集	6. 最初と最後の頁 7-12
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 新宮唯史・中村文則・大熊真貴・柿原芳彦	4. 巻 Vol.43
2. 論文標題 降雨と飛来塩分を再現したコンクリート構造物の表面物質量に関する実験	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 520-525
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 増田 健・中村文則・山口貴幸・下村 匠	4. 巻 Vol.43
2. 論文標題 3次元仮想空間技術を利用した構造物の維持管理システムの提案とその検証	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 907-912
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 中村文則・増田 健・山口貴幸・下村 匠	4. 巻 22
2. 論文標題 構造物の外部環境作用の時空間予測と遠隔管理技術を融合した環境管理システムの開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンクリート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告集	6. 最初と最後の頁 309-314
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 中村文則・小川晴希・山口貴幸・下村 匠	4. 巻 45
2. 論文標題 塩害環境下に設置されたPC桁の損傷・内部劣化促進物質量の調査と外部環境予測	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 掲載決定
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4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 中村文則
2. 発表標題 侵食型の海岸地形変化が大気中の飛来塩分量に与える影響
3. 学会等名 混相流シンポジウム2022講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 篠地叡生
2. 発表標題 高潮予測モデルを統合した橋桁の危険度推定モデルの構築とその検証
3. 学会等名 第40回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中村文則
2. 発表標題 コンクリート橋梁表面に作用する降雨粒子の到達分布に関する検討
3. 学会等名 混相流シンポジウム2021講演論文集
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村文則
2. 発表標題 北陸・東北地方の日本海沿岸部における飛来塩分の現地観測と環境作用の影響
3. 学会等名 第68回海岸工学講演会
4. 発表年 2021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	下村 匠 (Shimomura Takumi) (40242002)	長岡技術科学大学・工学研究科・教授 (13102)	

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