

令和 4 年 5 月 13 日現在

機関番号：13102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02212

研究課題名(和文) 実空間・サイバー空間連携システムによるコンクリート構造物の環境劣化予測技術の開発

研究課題名(英文) Development of environmental deterioration prediction technology of concrete structures using a cyberspace system

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) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、コンクリート構造物の外部環境作用に応じた表面物質量を予測できる環境劣化予測モデルの構築を行った。さらに、実空間と連携(同期)したサイバー空間内で、構造物を時空間的に管理する技術の開発を行った。その結果、構築した予測モデルは、構造物外部の環境作用とコンクリート表面の劣化促進物質量を統合して予測でき、その結果が環境作用を再現した模型実験の結果とほぼ一致することが示された。さらに、開発した実空間・サイバー空間連携システムは、沿岸部に設置された実構造物に直接適用することができ、サイバー空間を利用して環境作用を時空間的に管理できることが明らかになった。

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の表面境界条件を高精度化するものである。将来的にコンクリート構造物の内部鉄筋腐食による長期耐久性の低下を正確に予測する技術となり、構造物の安全性を向上させる点において社会的意義がある。さらに、構築した予測モデルと情報工学分野で研究が進んでいるサイバー空間技術を統合することで、サイバー空間内で構造物の維持管理が可能な実空間・サイバー空間連携システムの開発を行った。このシステムは実構造物に直接適用することができ、コンクリート構造物の設計・維持管理の効率化に有効な技術になる。

研究成果の概要(英文)： In this study, to predict the degradation of concrete structures, we developed an environmental degradation prediction model that can predict the amount of surface materials in concrete structures in response to external environmental actions. Furthermore, we developed a technology for managing structures in cyberspace. The results show that the constructed prediction model is capable of integrating environmental actions outside the structure and the amount of material on the concrete surface. Furthermore, it is clear that the developed cyberspace system can be applied directly to real structures and can manage environmental conditions acting on concrete structures.

研究分野：土木材料、施工および建設マネジメント関連

キーワード：塩害 飛来塩分 劣化予測 サイバー空間 維持管理 環境作用

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長期供用性を予測する研究は、計算機の発達とともに近年急速に進歩している。それに応じてコンクリート内部の劣化促進物質(主に水分・塩分)の移動についても、その初期および境界条件が正確に与えられた場合に、数値解析により精度良く予測できるようになっている。その一方で、構造物表面に到達した劣化促進物質は降雨の洗い流し作用によって再配分され、最終的に表面に残ったものがコンクリート内部に浸透するため、その量が劣化予測解析の境界条件となる。しかしながら、表面境界での環境作用に応じた物質量を定める方法は十分に確立できていないのが現状である。これは、構造物内部における劣化予測解析の表面境界条件の予測精度が低下しており、これまでの研究成果を最大限に活用できていないことを意味している。

2. 研究の目的

本研究では、コンクリート工学および流体力学分野の知見を総合的に利用して、構造物外部から内部までの物理現象を統合した環境劣化予測モデルの開発を行う。さらに、実空間と連携(同期)したサイバー空間システムを構築し、それを用いてコンクリート構造物の供用開始から終了までの劣化予測を実施できる技術を開発することが目的である。

3. 研究の方法

本研究では、以下の(1)～(4)のような方法で研究を実施した。

(1) 自然環境作用に応じた構造物の表面境界部における物理過程の解明

構造物内部の劣化予測解析の境界条件となるコンクリート表面・表層での環境作用とそれに応じた物質量の関係を詳細に解明するために、模型実験を実施した。ここでは、構造物に到達する降雨と飛来塩分粒子の表面分布、降雨による表面塩分量の洗い流し後の表面塩分の損失・再配分の過程の解明を行った。

実験は、新潟県の長岡技術科学大学の構内に図1のような施設を構築して実施した。この施設は、風および降雨、飛来塩分の自然環境作用を再現できるものであり、施設内部に鉄筋コンクリート製の模型が設置されている。施設内には、風況を再現するための送風機、降雨発生機、塩分噴霧器が設置されており、両側面に高さ3.7mの側壁が設置されている。実験で使用した模型は、図2のような橋桁側面の一部を模擬した鉄筋コンクリート製の2種類である。寸法は高さ2.20m(地表面から2.50m)、幅1.60m、奥行1.80mである。

実験方法は、送風機で風を送風し、降雨粒子または飛来塩分粒子を一様に発生させる方法で実施した。風速は模型から風上に3mの位置で、風速0.0m/sと3.8m/s程度の条件となるように調整した。降雨水量は、無風時の模型近傍で1時間当たり30mm程度の条件とした。飛来塩分粒子は、実際の海岸近傍で輸送されている直径 $100\mu\text{m}$ 程度の飛来塩分粒子を再現し、模型表面に作用させた。

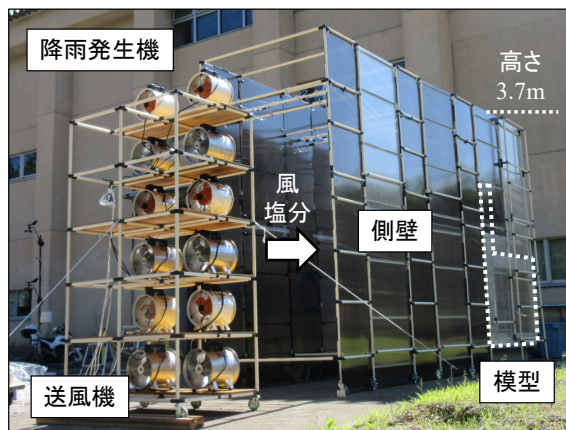


図1 実験施設

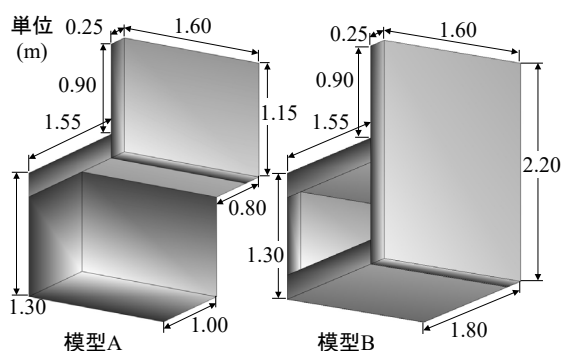


図2 実験模型(鉄筋コンクリート製)

(2) 構造物の外部・表面境界部の物理過程を統合した環境劣化予測モデルの開発

構造物の外部・表面境界における自然環境作用(風、降雨、飛来塩分)の予測モデルの開発を行った。さらに、模型実験を再現した予測解析を行い、予測結果と実験結果について比較を行った。構造物周辺の風の数値モデルは、3次元N-S方程式モデルを構築した。模型に作用する降雨粒子および飛来塩分粒子の移動・到達過程のモデルは、降雨粒子と飛来塩分粒子が流体で構成された粒子であることから、同様の数値モデルで予測できると仮定した。降雨と飛来塩分粒子の予測は、それぞれの粒子を円形の水滴と仮定し、そこに作用する風の抗力および重力、浮力、慣性力のつり合いから粒子の移動と構造物表面への到達過程を計算できるモデルを構築し、予測計算を行った。

構築した予測モデルの妥当性の検証をするために、自然環境作用とコンクリート表面の物質量の模型実験を再現した計算を実施した。計算領域は、図3のような模型実験の施設を再現した長さ13.2m、幅3.4m、高さ8.0mの空間である。計算地形および構造物は、屋外実験場周辺を対象に3次元測量(レーザープロファイラ)と写真測量を実施し、その結果から構築した。計算領域の境界条件は、側面部と上部を自由流出境界、それ以外の面を壁面境界として設定した。

風の流入境界で設定する風速、降雨および飛来塩分の粒子は、模型実験で設定した条件と一致するようにそれぞれを設定した。飛来塩分粒子の粒径は、模型実験で設定した粒径の条件を再現するように直径10~400 μm を設定した。飛来塩分粒子の配置は送風機から0.5mの位置で、鉛直方向に一定の割合で与えた。

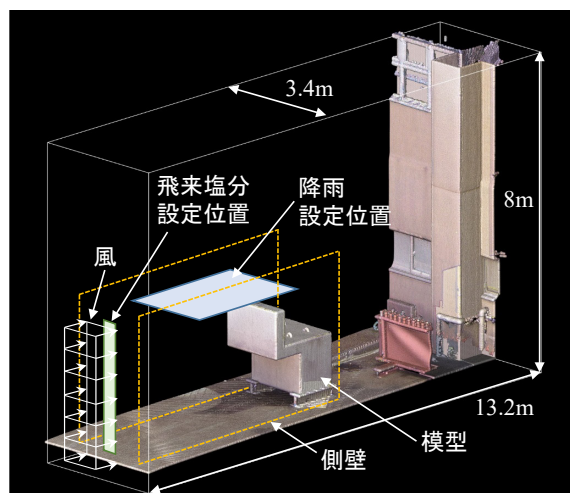


図3 計算領域

(3) 実空間・サイバー空間連携システムの開発と妥当性の検証

サイバー空間(仮想空間)内で、コンクリート構造物をリアルタイムで管理することが可能な実空間・サイバー空間連携システムの構築を行った。本連携システムの全体構成を図4に示す。図中の1)は、構造物周辺の環境作用(気象・波浪)の観測結果を自動で取得するシステムである。図中の2)は、構造物周辺の環境作用を予測するシステムである。環境作用の予測は3次元の数値シミュレーションを利用した。図中の3)は、仮想空間を利用して数値シミュレーションから得られた予測結果を時空間的に管理するシステムである。

開発したシステムの予測結果を詳細に検証するたるために、長岡技術科大学の屋外実験場に鉄筋コンクリート製の模型を作製し、それを対象に予測解析と実証実験を実施した。実証実験は、2020年9月1日~2021年12月20日の期間に実施した。屋外実験場に設置した模型には、温度とひずみセンサーを埋設した。実験での環境作用の測定項目は、風速・風向、日射範囲、日射量、気温、降雨量、構造物表面と内部の温度、模型表面の降雨作用状況(画像)であり、これらを10分間隔で測定した。

予測解析は、実験模型を中心に20m \times 50mの範囲を対象に数値空間を構築して実施した。予測期間は2020年10月1日~2021年12月20日である。

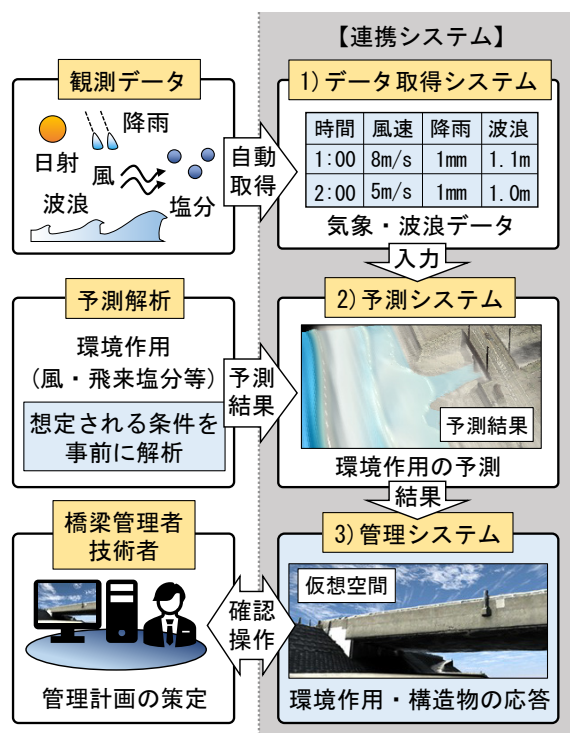


図4 連携システム全体の概要

(4) 実空間・サイバー空間連携システムの実構造物への実装

開発したシステムの実構造物への適用性を確認するために、日本海沿岸部に設置されている実橋梁を対象にシステムの実装を行った。対象とした構造物は、新潟県上越地方に位置するコンクリート橋梁であり、供用開始は2001年11月である。橋桁の寸法は、橋長75.3m、桁幅21.9mである。この橋梁は、汀線から50m程度の位置に設置されており、冬季の季節風により飛来塩分の作用を受ける特徴がある。

連携システムによる予測期間は、橋梁の供用が開始された2001年11月~2020年12月31日の約19年間である。予測の時間間隔は1時間間隔であり、一部の期間をリアルタイムで自動予測した。これらの解析は1回の予測計算に数十時間の計算時間が必要であり、計算時間が実時間の経過より長くなるため、リアルタイムで予測結果を更新することが不可能である。そのため、発生する気象・波浪条件の範囲を想定し、風況、波浪、飛来塩分の予測解析を事前に実施することにした。事前に実施した予測解析は、海風となる気象条件を対象に風況が110種類、波浪が9種類であり、飛来塩分の発生・輸送過程はそれらの条件を組み合わせた990ケースである。

4. 研究成果

(1) 自然環境作用に応じた構造物の表面境界部における物理過程の解明

図5は、飛来塩分を供給後に降雨を30分間作用させた条件での表面塩分量の測定結果である。図の表面塩分量は、蛍光X線法測定機器を用いて、表面・表層部の塩化物イオン量を測定した値である。図より、表面塩分量は、模型下部では大きく、模型上部では下部と比較して少ない傾向が見られる。これは、降雨を作用させる前の表面塩分量の分布と同様の傾向である。この結果から、短期的な降雨作用の前後では、コンクリート表面・表層部における表面塩分量の分布は大きく変化がなく、降雨作用の影響が小さい可能性があることが明らかになった。

また、コンクリート構造物への自然環境作用を再現した模型実験の結果から、模型表面に到達する降雨水および飛来塩分粒子は、模型形状に応じて変化しており、表面に作用する物質は風の有無によっても大きく変化することが示された。

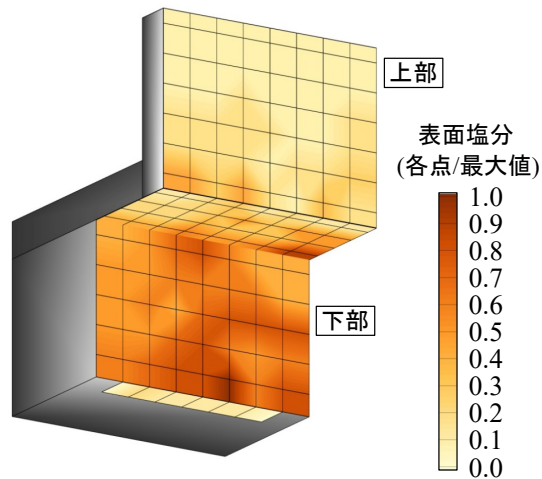


図5 降雨作用後の表面塩分量の分布

(2) 構造物の外部・表面境界部の物理過程を統合した環境劣化予測モデルの開発

図6は、模型側面に到達した飛来塩分粒子の分布を示した計算結果である。図の飛来塩分粒子は、模型上部の壁面では全面に到達しているが、模型下部の張出部付近では一部で到達していない部分が見られる。この結果は模型実験の結果と同様であり、実験においても模型下部の張出部付近では、飛来塩分の到達量が少ない傾向であった。これは、模型張出部の形状による風の流れの変化と粒子の自重による沈降現象が影響していると考えられる。また、このような粒子の壁面への到達過程は、降雨粒子の実験結果でも同様の傾向であった。降雨粒子の作用後の実験結果では、模型下部の地表面に近い部分のみに粒子が到達している状況が見られた。これは、降雨粒子のほうが飛来塩分粒子より粒径が大きく、粒子の自重による沈降の影響を強く受けるためであると考えられる。

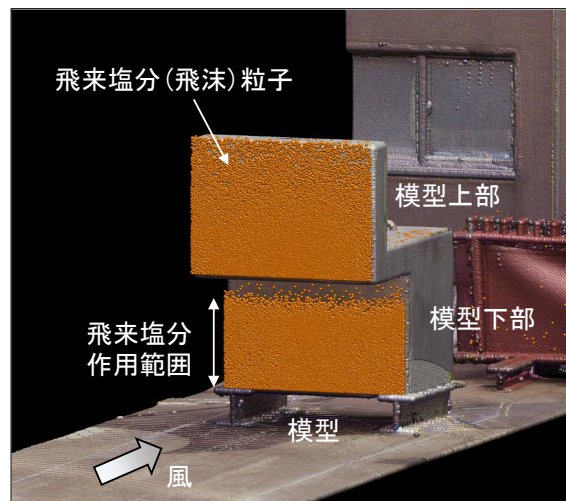


図6 模型表面に到達した飛来塩分

図7は、飛来塩分(飛沫)粒子の到達量の計算結果と実験結果を比較したものである。図の実験結果は、構造物表面に到達した飛来塩分粒子を感水試験紙で可視化し、それを画像解析したものである。図より、計算結果の到達量は、模型上部では実験結果と同様である。模型下部では局所的に過少となっている部分が見られ、飛来塩分粒子の到達範囲を比較した結果では、計算結果と実験結果がおおむね一致している。この点から、計算結果は模型下部の到達量で若干過少な傾向となっているが、飛来塩分粒子の到達範囲については実験結果を再現できており、構築した飛来塩分の予測モデルは飛来塩分の輸送・到達過程を予測できていると考えられる。また、降雨粒子については、到達量とその到達範囲が予測結果と実験結果でほぼ一致する結果であった。

これらの結果より、構築した予測モデルは、構造物に作用する降雨や飛来塩分などの環境作用とその表面の物理量を汎用的に予測できることが示された。構造物の外部の環境作用からコンクリート表面部の物質量の予測が可能な環境劣化予測モデルが構築できたといえる。

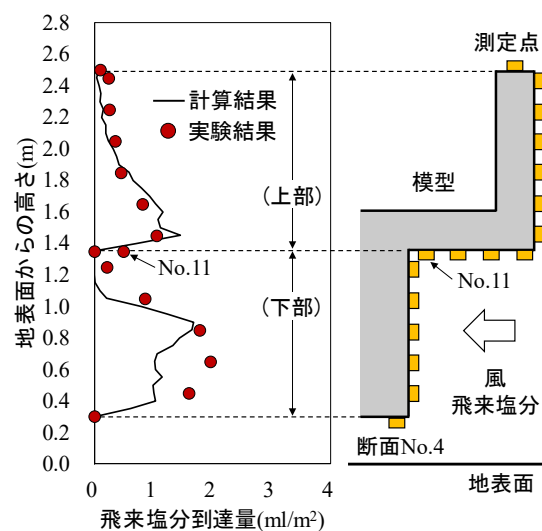


図7 予測結果と実験結果の比較

(3) 実空間・サイバー空間連携システムの開発と妥当性の検証

図8は、仮想空間内に構築したコンクリート模型周辺における自然環境作用(日射、風況、日射に伴う表面温度、降雨)の予測結果である。図の結果は2020年10月18日のものである。図より、システム内の模型周辺で、日射とそれに伴う影、風況、表面温度、模型表面の降雨作用の分布が確認できることがわかる。温度予測の結果は、構造物表面の温度分布であり、日射に伴うコンクリート表面の温度変化が予測できている。これらの予測結果と実験結果を比較した結果では、模型表面に到達する降雨作用の予測結果で予測精度が低い傾向が見られたが、その他の項目ではほぼ一致する傾向が示された。

以上の結果より、実空間の測量結果から構築した仮想空間と環境作用の予測モデルを統合することで、仮想空間内で構造物を管理できることが明らかになった。

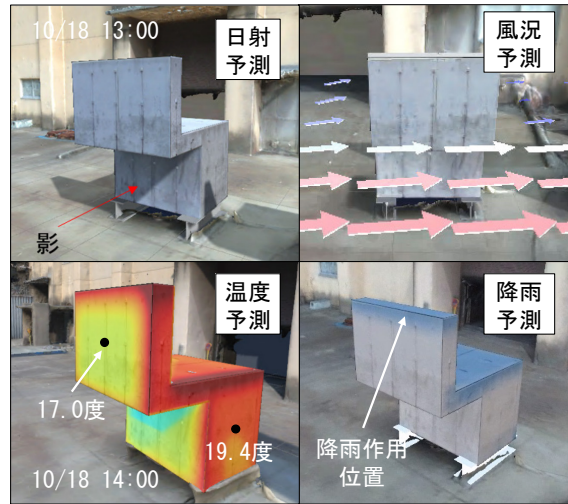


図8 仮想空間と環境作用の予測結果

(4) 実空間・サイバー空間連携システムの実構造物への実装

図9は、仮想空間において2017年3月3日14:00の構造物周辺の風況と飛来塩分量の空間分布を示した結果である。図の矢印の向きは風の方向、矢印の大きさは風速を示している。図の青色から赤色の平面的な分布は、飛来塩分量(輸送量)の値である。図より、構築した仮想空間内で、構造物周辺の風と飛来塩分量の状況が空間的に確認できることがわかる。予測結果では、風が海域から陸域方向へ作用しており、構造物が設置されている位置より海側では飛来塩分量が2~3g/m²/h程度で輸送されている。実際の2017年3月3日の実構造物周辺の環境作用は、冬季の季節風が卓越した条件であり、構造物周辺では海域から発生した飛来塩分が輸送されている状況であった。その点から、予測結果は実空間をおおむね再現できていると考えられる。

図中の3つの結果は、仮想空間内で視点を移動させたものである。構築した仮想空間にアクセス後、キーボードまたはマウスを使用して操作することで、構造物の各部位周辺の状況および環境作用を簡易かつ空間的に確認・管理できることがわかった。

図10は、2018年2月18~19日に実施した飛来塩分の予測結果と観測結果の比較である。飛来塩分量の観測方法は、ガーゼ法である。暴露時間は24時間であり、2時間間隔で塩分捕捉器を11回交換する方法とした。図に示すように、観測結果の飛来塩分量は、時間の経過とともに大きく変化しており、2月18日8~16時で塩分量が大きく、それ以降の時間では少ない傾向となっている。2月18日18時~19日2時の期間では、飛来塩分量が少なくなっているが、これは構造物周辺で風が緩やかな陸風であったためである。予測結果と観測結果を比較した結果では、全体的に予測結果の方が過少となる傾向が見られるが、観測期間全体の変動傾向は再現できている。

以上より、開発した実空間・サイバー空間連携システムは、実構造物に直接適用できるとともに、実構造物に作用する環境作用をリアルタイムで予測できることが示された。さらに、仮想空間を利用することにより、その予測結果を時空間的に管理できることが明らかになった。

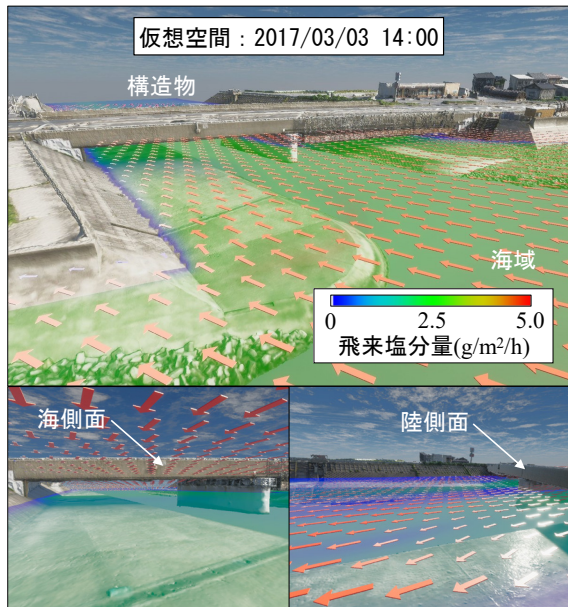


図9 実構造物周辺の環境作用の予測結果

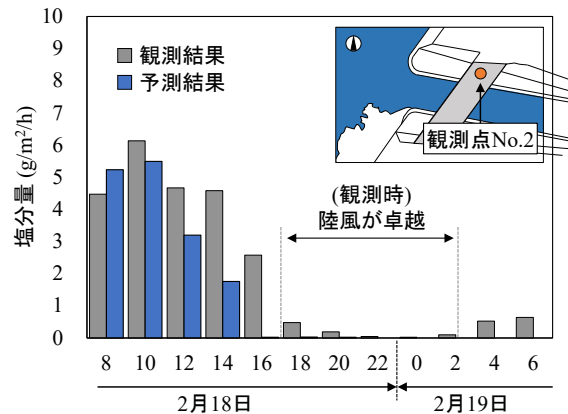


図10 飛来塩分の予測と観測結果の比較

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 1件）

1. 著者名 中村文則・大原涼平・山口貴幸・下村 匠	4. 巻 Vol.76
2. 論文標題 沿岸域の地形条件を含めたコンクリート構造物の表面塩分の定量的評価手法の構築	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造)	6. 最初と最後の頁 189-208
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 中村文則・LUIS ARTURO GARCIA MARTINEZ・山口貴幸・下村 匠	4. 巻 Vol.42
2. 論文標題 コンクリート構造物表面における降雨・飛沫粒子の到達量に関する実験	5. 発行年 2020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 587-592
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 Nguyen Ho Quang・中村文則・井向日向・山口貴幸・下村 匠	4. 巻 20
2. 論文標題 降雨作用を受けるコンクリート構造物の表面・表層部の表面塩分量に関する実験	5. 発行年 2020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 215-220
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 崎原康平・中村文則・滝 勇太・山田義智	4. 巻 20
2. 論文標題 機械学習による沿岸周辺環境を考慮した飛来塩分予測に関する研究	5. 発行年 2020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 233-238
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 請外 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 請外 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・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 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 -

[学会発表] 計3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 コンクリート橋梁の側面に作用する飛沫粒子に関する基礎的研究
3. 学会等名 混相流シンポジウム2020講演会
4. 発表年 2020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講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村文則
2. 発表標題 仮想空間技術を利用した構造物外部の環境作用の管理システムの基礎的研究
3. 学会等名 第66回理論応用力学講演会
4. 発表年 2022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)	
研究分担者	神田 佳一 (Kanda Keiichi) (60214722)	明石工業高等専門学校・都市システム工学科・教授 (54501)	

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