

令和元年6月25日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02261

研究課題名(和文) 沿岸構造物の維持管理戦略に資する海塩粒子付着量の推定と腐食劣化予測に関する研究

研究課題名(英文) Estimation of adhesion amount of airborne sea salt on coastal structures and prediction of their deterioration due to corrosion

研究代表者

八木 知己 (Yagi, Tomomi)

京都大学・工学研究科・教授

研究者番号：30293905

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 28,100,000円

研究成果の概要(和文)：橋梁等の沿岸構造物の維持管理に資する海塩粒子付着量の推定手法の開発に関する研究を行った。具体的には、観測または数値計算による気象要素・大気中塩分濃度獲得手法の検討、統計的手法による付着量評価、付着塩分の洗浄とコンクリート内部への浸透問題に加え、空気力学的対策による付着量低減手法の開発や、腐食劣化した支承の性能評価も行った。さらに、海塩粒子に加え凍結防止剤に関する諸問題にも取り組んだ。

研究成果の学術的意義や社会的意義

広域気象から粒子径に至る様々なスケールを研究の対象とする点に学術的な特色がある。気象学、風工学、粉体工学、材料学の知見を巧く組み合わせ、様々な力学モデルを作成し、付着塩分量の定量化を試みることは独創的と思われる。本研究では、橋梁地点の気象要素・大気中塩分濃度の獲得から、橋梁断面周りの気流計算、さらには橋梁表面への付着塩分量評価に至る一連の過程を数値計算で達成することに成功しており、国内に無数ある橋梁の維持管理を考える上で、社会的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：We sought to develop the evaluation method of adhesion amounts of airborne sea salt for the maintenance of coastal structures including bridges. We discussed acquisition methods of meteorological data and airborne sea salt concentrations, washing-out and penetration into the inside of concrete members of deposited salt. We also introduced a statistical method for evaluating adhesion amounts of salt. In addition, we developed aerodynamic countermeasures to mitigate the adhesion of airborne sea salt particles on bridge girders. Moreover, the evaluation of the performance of an old bearing was conducted. Effects of de-icing salt as well as sea salt were also investigated.

研究分野：風工学，橋梁工学

キーワード：海塩粒子 飛来塩分 付着塩分 凍結防止剤 腐食 ドライガーゼ法 維持管理 支承

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

海塩粒子は鋼構造物の3大腐食因子(酸素、水、海塩粒子)のひとつであると同時に、コンクリート構造物の塩害や海岸地域の農作物の塩害の主要因でもあることから、以前より工学や農学分野で研究がおこなわれている。例えば、土木研究所により実施された測定がその代表例である(飛来塩分量全国調査(),土木研究所資料第3175号,1993)。この測定は昭和59年から3年間、全国266地点で実施され、土研式タンク法による測定に基づき mdd 値(断面積100 mm²を一日に通過する塩分量 [mg])として飛来塩分量が地点ごとに示されている。mdd と鋼材の腐食速度の関係についてもデータが多数公開されており、鋼構造物の防食、劣化防止に役立てられている。また、平成14年に改訂された道路橋示方書・同解説 鋼橋編では、飛来海塩粒子量を判断基準に、耐候性鋼材の使用、防食塗装の実施が規定されている。さらに、耐候性鋼材の腐食速度 [mm/year] を架設地点の環境条件から推定する回帰式が提案されており、防食対策や維持管理に役立てられている(紀平ら,土木学会論文集, No.780/1-70, 71-86, 2005)。送電施設においても、維持管理・健全性評価に関わる課題として、飛来塩分量の評価や鋼材腐食量の推定について現在研究が進められている(電気学会技術報告,第1163号,2009)。応募者の研究グループでは、大鳴門橋や国道42号線天鳥橋を対象に、mdd 値ではなく大気中塩分濃度をもとに、降雨による付着塩分の洗浄効果も加味した橋梁各部位の表面付着塩分量の推定を行い、現地観測結果をある程度再現することに成功している(例えば、野口ら:構造工学論文集, Vol.59A, 585-595, 2013; Vol.60A, 613-621, 2014)。

しかし、現状では任意地点の橋梁のある部材に付着する塩分量を推定し、腐食・劣化状況を予測することは、いまだ困難である。したがって、本研究では気象学、風工学、粉体工学、材料学の知見を基に、塩分量や腐食量の定量化に取り組み、確率統計的な考えを導入した腐食劣化予測手法の提案をしたいと考えた。ただし、個々の橋梁に煩雑な解析を必要とする腐食劣化予測システムの構築ではなく、実際の維持管理業務に適用可能な簡便な手法を提案すること、また、各種パラメータ等を并勘定ではなく、物理的な背景を基に決定できる定量的なデータを提供することが望ましいと考えられる。

2. 研究の目的

以上の背景に基づき、本研究では、沿岸構造物(特に橋梁)の維持管理に資する海塩粒子付着量の推定手法の開発に関して研究を行った。具体的には、以下の内容を目的として研究を開始した。気象モデルを用いた対象地点の気象データ・塩分濃度の確率統計的予測、風工学や粉体工学を基にした海塩粒子の部材表面への付着機構のモデル化、気象条件および雨水と結露による洗浄効果を考慮した部位別の塩分付着量の推定(コンクリート内部の浸透塩分量の推定、付着塩分量の低減方法の開発等を含む)、付着塩分量と腐食量の確率統計的な関係解明、以上の結果を基に、構造物個々にきめ細かく、かつ限られた予算で効率的に維持管理ができる腐食劣化予測手法の提案。

3. 研究の方法

本研究では以下に大別される課題について取り組んだ。なお、当初の予定には含まれていなかったが、凍結防止剤の道路面からの飛散についても、海塩粒子と同様に重要な課題であり、また同様のアプローチで研究を行えることから、併せて検討を行うこととした。

(1) 橋梁周辺の気象要素・大気中塩分濃度シミュレーション

構造物へ付着する塩分量を評価するうえで、当該地点の気象環境や飛来塩分環境を的確に把握しておくことが重要である。本研究では、現地観測による大気中塩分濃度の評価や塩分捕集器具の性能評価を行うとともに、数値計算(領域気象モデル WRF)によって気象要素や大気中塩分濃度を評価する方法についても検討を行った。また、確率統計的手法を用いることによる各種気象要素や大気中塩分濃度の表現、および付着塩分量の評価を行った。

(2) 橋梁各部位の表面付着塩分量の推定および低減手法の開発

海塩粒子は風の流れによって橋梁表面に到達し、付着することから、橋梁に付加部材を設けることで風の流れを強制的に変化させ、その結果として付着量を低減する手法について、数値流体解析(CFD)によって検討を行った。また、橋桁だけではなく、支承部の腐食劣化に着目し、長期間使用され腐食した金属支承の性能評価にも取り組んだ。

(3) 降雨と結露による付着塩分の洗浄効果とコンクリート内部における浸透塩分量のモデル化

海塩粒子は橋梁表面に付着するばかりではなく、表面に発生する水滴によって洗浄される可能性も考えられることから、屋内実験と数値計算を組み合わせ、橋梁表面に発生する水量や流下に伴う塩分洗浄の程度について検討を行った。また、コンクリート橋の場合には、表面に付着した塩分の一部は内部へと浸透するため、周辺環境がコンクリート内部への塩分侵入に及ぼす影響について、実験的・解析的に検討を行った。

(4) 凍結防止剤の飛散と付着シミュレーション

車両通交等によって道路面から凍結防止剤が飛散し、その一部は橋梁主桁へ付着する可能性

があるため、数値流体解析に基づくシミュレーションを行い、接近風や塩分粒子諸元に応じた付着の可能性の検証、および付加部材による気流操作を利用した付着低減手法について検討を行った。

4. 研究成果

(1) 橋梁周辺の気象要素・大気中塩分濃度シミュレーション

観測実績が豊富かつ利用が簡便なドライガーゼ法について、大気中の塩分粒子の捕集メカニズムや捕集効率を風洞実験および数値流体解析(CFD)に基づいて検討した。接近流の一部が図1のように捕集装置を迂回することもあり、捕集効率が接近風速だけではなく接近風向の影響も強く受けることを明らかにした。すなわち、ドライガーゼ法で捕集された塩分量から大気中の塩分濃度を評価するためには、捕集装置に対して斜めに風が吹く場合を適切に考慮する必要がある。今後は、塩分その他の付着物による、ガーゼの捕集性能の経時変化を解明する必要がある。

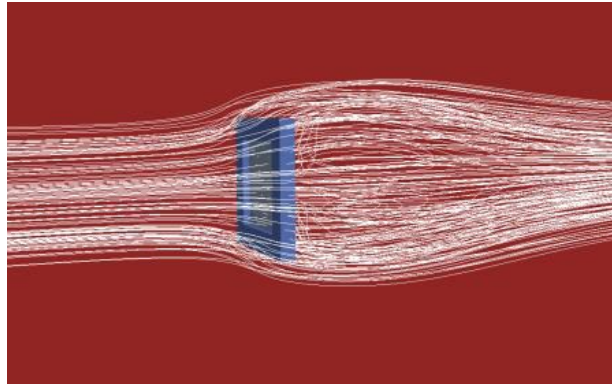


図1 捕集装置周りの気流の様子

また、領域気象モデルWRFによる気象要素および大気中塩分濃度の算出精度を検証するため、日本の各地を対象とした解析を行い、気象要素は観測値を良好に再現することができる一方で、大気中塩分濃度の評価には課題が残っており、物理モデルの選択や海水温等の境界条件の観点からも検討が必要といえる。なお、空間解像度の限界から、風速をやや過大評価する傾向にあるが、CFDによってより細かな起伏を考慮した流れ場計算を行うことで、風速の過大評価が改善され、観測値の再現性が向上することも明らかにした。

さらに、モンテカルロシミュレーションを利用することで、大気中塩分濃度や風速および付着塩分量の統計的な評価が可能であることを明らかにした。また、確率分布による直接的な表現が難しい風向について、風向と風速の2変数を風速の直交する2変数で表現する手法を提案し、その妥当性や適用性を明らかにした。今後は変数間の相関をより適切に考えるための手法を検討する必要がある。

(2) 橋梁各部位の表面付着塩分量の推定および低減手法の開発

I桁橋と箱桁橋を対象として、橋梁へ付着する塩分量の低減手法をCFDによる数値計算によって検討した。結果として、防音壁を設置することや、管理用通路・パイプラインなどを適切な桁間に設置することで、付着塩分量の低減が見込めることが明らかとなった。また、付加部材として鉛直板を橋梁最上流側の桁の下方に設けることで、流れの剥離点が下がること由来し、付着量が小さくなることが判明した。図2はI主桁橋の下方に鉛直付加部材を設けた例、および高欄(防音壁)を延長した例である。今後は空気力学的観点から付着量を減らすことができる手法について、今回提案した付加部材以外の方法についても考案・調査を行いたいと考えている。

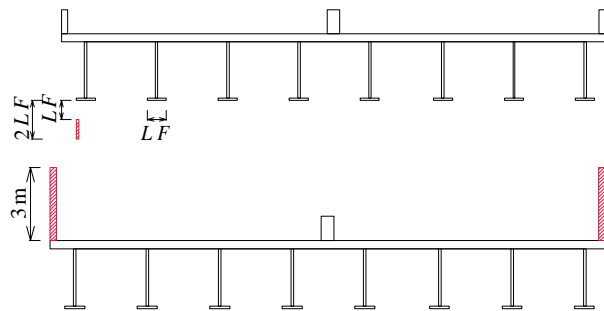


図2 付加部材の一例

さらに、40年間使用されたBP-A支承および新規支承に対して各種実験を行い、劣化した支承の挙動は設計で想定しているものとは大きく異なること、上沓の滑り面のメッキが剥がれて腐食し大きく平滑性を失っていること、およびベアリングプレートと下沓に生じる固着の原因などを明らかにした。

さらに、40年間使用されたBP-A支承および新規支承に対して各種実験を行い、劣化した支承の挙動は設計で想定しているものとは大きく異なること、上沓の滑り面のメッキが剥がれて腐食し大きく平滑性を失っていること、およびベアリングプレートと下沓に生じる固着の原因などを明らかにした。

(3) 降雨と結露による付着塩分の洗浄効果とコンクリート内部における浸透塩分量のモデル化

橋梁表面の付着塩分については、3主1桁を有する鋼橋に対して2次元表面温度解析および結露発生解析を行い、ウェブ部とフランジ部では結露発生量が異なること、その結果として腐食性状にも違いが生じる可能性があることを明らかにした。また、水滴の流下に伴う塩分洗浄効果を実験的に調査し、その結果を踏まえた付着塩分量計算を行ったところ、水滴の流下を考慮することで付着塩分量の予測値が実橋での観測値に近づくことが明らかとなった。図3は水滴流下のシミュレーション結果の一例である。今後の課題としては、数値計算上のパラメータや実際の橋梁周りの温湿度環境に関する実測などを進め、計算の妥当性の検証を行う。

飛来塩分がコンクリート表面に付着した場合について、降雨等による乾湿繰り返しの効果も含めたコンクリート内部の塩化物イオンの移動に関する数値計算より、降雨の頻度や降雨時間は内部の塩化物イオン濃度分布に影響を与え、塩害の進行が促進される場合もある一方、外部へ洗い出されるものも存在することが示唆された。また、コンクリートに微小ひび割れが存在する場合、コンクリート表面の塩化物イオン濃度に対する影響は小さいものの、内部の見かけの拡散係数が大きくなることが判明したため、内部への塩分浸透は促進されると考えられる。

(4) 凍結防止剤の飛散と付着シミュレーション

周囲に障害物のない平坦な道路面から車両通交によって飛散する凍結防止剤について、数値解析的な検討を行った結果、横風的作用によって飛散範囲が水平・鉛直の両方向に拡大すること、路肩に近いほど地面への沈着量が多いという定性的な傾向を再現することに成功した。また、単独で存在する橋梁の路面から飛散した凍結防止剤について、橋梁の下流側に生じる渦の影響で、凍結防止剤が橋梁主桁表面に到達する可能性があることに加え、高欄（または防音壁）の高さによって、主桁に到達する塩分粒子の大きさや量が変化することを明らかにした。図4

は2種類の粒径における飛散の様子を示している。従来は単独で存在する橋梁から飛散した凍結防止剤の主桁への付着は考えられていなかったが、本研究により、塩分付着に起因する主桁劣化の可能性があることが示唆された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計11件)

1. 坪倉佑太, 石渡純也, 徳増秀俊, 白土博通, 野口恭平, 八木知己: CFDによるドライガゼ法捕集装置近傍での塩分粒子の挙動評価, 第25回風工学シンポジウム論文集, 157-162, 2018. 査読あり.
2. 高橋良和, 楊晰, 長谷川晋也, 丹羽雄一郎, 矢島秀治: 経年40年のベアリングプレート支承(BP-A 支承)の水平・回転変形追従性能実験, 構造工学論文集, Vol. 64A, 26-37, 2018. 査読あり.
3. 野口恭平, 金城佑紀, 秦聡一郎, 白土博通, 八木知己, 中西克佳: 任意地点橋梁における部位別の飛来塩分量予測, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 73, No. 2, 364-375, 2017. <https://doi.org/10.2208/jscejsee.73.364>. 査読あり.
4. Kyohei Noguchi, Hiromichi Shirato, Tomomi Yagi: Numerical evaluation of sea salt amounts deposited on bridge girders, Journal of Bridge Engineering, Vol. 22, Issue 7, 2017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001061](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001061). 査読あり.
5. Michael Mbithi, Tomomi Yagi, Kyohei Noguchi, Masatoshi Shigeta, Kenichi Sugii, Hiromichi Shirato: Flow field control to mitigate airborne sea salt adhesion on bridge girders, Structure and Infrastructure Engineering, Volume 14, Issue 3, 348-364, 2017. <https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1354031>. 査読あり.
6. 秦聡一郎, 白土博通, 野口恭平, 八木知己: 車両走行による凍結防止剤の飛散特性, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 73, No. 1, 195-205, 2017. <http://doi.org/10.2208/jscejsee.73.195>. 査読あり.

〔学会発表〕(計34件)

1. ○Kyohei Noguchi, Hiromichi Shirato, Tomomi Yagi: Numerical evaluation of salt amounts on bridge girders based on air flows, The 12th Japan - Taiwan Workshop on

Amount of salts on surface after washing-out [mg/m²]

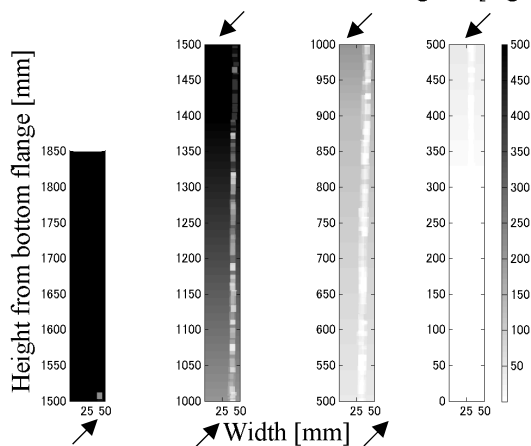


図3 水滴流下による洗浄の様子の一例(計算領域を鉛直に4分割しており、縦軸は下フランジからの高さ)

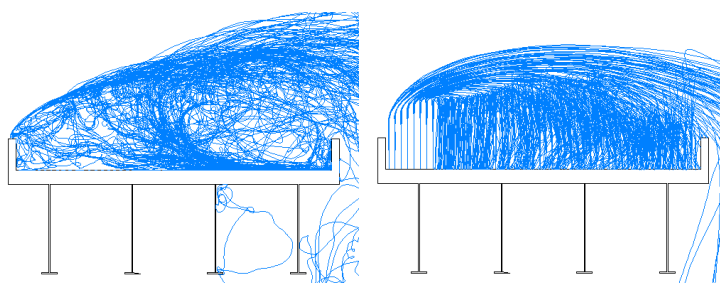


図4 半径10 μm(左図)および600 μm(右図)における凍結防止剤を模した粒子飛散の様子。

Structural and Bridge Engineering, 2019.

2. ○白井睦弥, 嘉屋明信, 平野裕一, Zhang Yukun, An Lin, 白土博通: 海岸部橋梁の部位別付着塩分量の調査と検討, 土木学会第 73 回年次学術講演会, 2018.
3. ○野口恭平, 井伊悠, 白土博通, 八木知己: ドライガーゼ法捕集装置周りの気流特性評価, 平成 29 年度日本風工学会年次研究発表会, 2017.
4. ○白井睦弥, 三歩一奏人, 平野裕一, 安琳, 白土博通: 移流拡散方程式による乾湿の激しい環境下でのコンクリート内部の塩化物イオン濃度分布評価, 土木学会第 72 回年次学術講演会, 2017.
5. ○楊晰, 高橋良和: 経年劣化したベアリングプレートを有する鋼製支承の水平・回転変形検証実験, 平成 28 年度土木学会関西支部年次学術講演会, 2016.

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 白土 博通
ローマ字氏名: SHIRATO, Hiromichi
所属研究機関名: 京都大学
部局名: 工学研究科
職名: 教授
研究者番号(8桁): 70150323

研究分担者氏名: 高橋 良和
ローマ字氏名: TAKAHASHI, Yoshikazu
所属研究機関名: 京都大学
部局名: 工学研究科
職名: 教授
研究者番号(8桁): 10283623

研究分担者氏名: 安 琳
ローマ字氏名: AN, Lin
所属研究機関名: 京都大学
部局名: 工学研究科
職名: 准教授
研究者番号(8桁): 40576237

研究分担者氏名: 野口 恭平
ローマ字氏名: NOGUCHI, Kyohei
所属研究機関名: 京都大学
部局名: 工学研究科
職名: 助教
研究者番号(8桁): 70802685

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。