

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 16 日現在

機関番号：13102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26870810

研究課題名(和文) 塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の表面到達塩分の予測システムの開発

研究課題名(英文) Development of prediction system for surface chloride of concrete 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・助教

研究者番号：70707786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：コンクリート構造物の塩害による劣化の進行予測を行うためには、構造物に塩害を生じさせる自然環境条件を的確に評価することが必要である。本研究では、塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の劣化の進行予測を高精度で行うために、構造物表面の到達塩分量を予測できる数値シミュレーションの開発を行った。その結果、構造物周辺の外部環境条件(風況・波浪)及び海域から発生する飛来塩分の発生・大気中の輸送・構造物表面への到達過程を統合した数値シミュレーションを構築し、実構造物の表面到達塩分量の予測システムを開発することができた。さらに、長期的に構造物に作用する構造物表面の到達塩分量を時系列で予測する手法を確立した。

研究成果の概要(英文)：Many concrete structures near shoreline receives salt damage by production and transportation of sea salt spray from sea surface. In this study, to discuss detailed sea salt spray of concrete structure surface, numerical schemes for production, transportation and accretion of sea salt spray was proposed. Calculation of transportation and accretion of sea salt spray was carried out on the condition which changed size of sea salt spray particle. Field measurements are also carried out to estimate amount of sea salt spray around the coastline in Niigata prefecture. In those results, a numerical scheme which can treat production, transportation and accretion of sea salt spray with coastal wave and atmospheric wind model was proposed. Production, transportation and accretion process of sea salt spray was showed by calculation results.

研究分野：土木材料・施工・建設マネジメント

キーワード：飛来塩分 塩害 到達塩分量 表面塩分量 数値シミュレーション CIM 維持管理 外部環境

1. 研究開始当初の背景

(1)コンクリート構造物の塩害による劣化の進行予測を行うためには、海水粒子の飛来、構造物への塩分の到達、降雨による塩分の洗い流しのような構造物に塩害を生じさせる自然環境条件を的確に評価することが必要である。土木学会コンクリート標準示方書では、この環境条件を構造物の表面塩分量でモデル化し、海岸からの距離に依存した値で定めているが、このような方法では次のような3つの問題がある。日本全国一律に海岸からの距離の関数で劣化外力を示すこととなること。塩分の飛来の性質(風、波浪)、気候(温度)による劣化進行の違いが反映されていないこと。構造物の周辺地形(海域地形、陸域地形、防風壁)による影響の違いが反映されていないこと。その結果、過剰な耐久性の要求、その一方で、予期せぬ早期劣化を招く可能性がある。

(2)これまでの既往研究で申請者らは、この問題を解決するために、構造物周辺の地形・気象(風)・波浪を考慮した海水粒子の飛来(飛来塩分)および構造物表面への到達塩分量を予測する数値モデルの開発を行った。その結果、申請者が開発したモデルにより、上記の問題点を解決することができた。一方で、申請者が開発したモデルでは、計算できる範囲が構造物周辺の数百m程度と狭く、予測できる時間も数分程度であるため、構造物の塩害劣化のような長期的な時間スケールの問題には適用できないといった問題がある。そこで、長期的な時間スケールの構造物表面の塩分量を数値シミュレーションにより高精度予測することが今後の課題の一つである。

2. 研究の目的

(1)本研究は、広域における長期的な気象・波浪条件を考慮した構造物表面の到達塩分量を予測できる数値シミュレーションの開発を行うとともに、数値シミュレーションの検証データの取得及びデータベースの作成を行う。

本研究期間内では、このモデルの問題点を改善し、広域における長期的な構造物表面の到達塩分量を予測できる数値シミュレーションモデルの開発を行う。さらに、現地観測データとの比較を行い、数値シミュレーションによる再現性の検証を行う。

本研究で開発した数値シミュレーションの検証データを取得するために、現地観測を行う。また、既往の現地観測データの整理を合わせて実施し、飛来塩分の高精度予測に必要な気象(風)・波浪条件と飛来塩分の関係について把握する。

塩害を生じさせる環境条件(気象、波浪、飛来塩分量)、コンクリート構造物の劣化状況、海岸の状況(飛来塩分の発生源となる消波ブロックの設置等)について、地理情報システム(GIS)を用いたデータベースに整理し、

ホームページ等で公開を行う。年間を通した飛来塩分量のデータを蓄積させることは重要であり、地理情報システム(GIS)を用いたデータベースとして、各研究者が共通の形式で公開することは、研究者や実務の技術者がデータを利用する上で有効的である。

3. 研究の方法

(1)長期的な飛来塩分の現地観測データと構造物に到達する飛来塩分の数値シミュレーションを利用した予測手法の開発について検討した。

新潟県上越地方に位置する名立大橋の橋桁周辺の長期的な外部環境及び橋桁への到達塩分量の変動を確認するために、風況、波浪、飛来塩分の現地観測データの収集を行った。データの収集期間は、2002年3月~2006年12月の約5年間である。飛来塩分の観測データは、土研式捕集箱で塩分を採取した観測結果を収集した。これは、寸法10cm×10cmの捕集板に到達した飛来塩分をポリタンク中に集める方法であり、構造物表面に到達する塩分量を測定する方法である。風速・風向データは、橋桁から沿岸方向に50m程度南側に設置されている気象ステーションを用いて観測したデータを収集した。風速・風向計の設置位置は地表面から高さ6mの位置であり、1時間間隔のデータを測定している。ただし、2004年以外では5月~10月の観測結果を取得できなかったため、その期間とデータの欠測の部分については、気象庁で公開している新潟県大潟観測点の観測データを橋桁周辺の値に換算して整理した。波浪データは、名立川河口部周辺では観測されていないため、20km程度離れた位置に設置されている全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)の新潟県直江津観測点の観測結果を取得した。

長期的に構造物に到達する飛来塩分の数値シミュレーションを利用した予測手法について検討を行った。具体的には、長期的な飛来塩分量の予測手法は、数値シミュレーションから飛来塩分の算定図(経験式)を作成し、そこから飛来塩分量を計算する手法とした。まず、飛来塩分の算定図を作成するための風環境及び飛来塩分の数値シミュレーションを実施する。数値シミュレーションの入力条件は、橋桁周辺の地形及び風速、波高である。算定図は、数値シミュレーションの結果を用いて、風速・波高と飛来塩分の関係を整りして作成した。また、算定図は橋桁各部位でそれぞれ作成し、現地観測を行っている地点の風速及び波高と橋桁各部位の塩分量の関係を算定図として整理した。最後に、作成された算定図を用いて、現地観測で得られた2時間間隔の風速及び波浪条件を入力し、飛来塩分の再現計算を行った。再現した飛来塩分の到達量は、収集した土研式捕集箱の現地観測結果と比較し、その妥当性について検討した。

(2)広域における飛来塩分量の現地調査および海岸特性と飛来塩分量の関係について検討を行った。

研究開始当初の計画では、土研式捕集箱を用いて、新潟県全域の現地調査を行うことを計画していたが、この方法では数点(計画では4地点)しか同時観測できないといった欠点があった。一方で、同時に数十点の現地観測が可能なモルタル供試体によって飛来塩分を採取する方法があるが、研究開始当初はモルタル供試体を作成・分析する技術が十分に無く、この方法での現地観測が不可能であった。しかしながら、研究申請者が機関を移動したことにより、モルタル供試体を作成できるようになったため、塩分の採取方法および観測箇所の変更を行った。

新潟県沿岸に位置する海岸において、飛来塩分の現地観測を実施した。観測箇所は、新潟県の佐渡地方を除く沿岸全域である。この地域は、冬季の季節風的作用により、飛来塩分が大量に輸送される地域であり、橋梁等のコンクリート構造物の塩害も多数報告されている。調査期間は、2016年2月11日~5月5日の75日間である。飛来塩分の採取はモルタル供試体を用いて行った。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材は川砂を用いた。寸法は縦30mm×横40mm×高さ5mmである。供試体は気中養生後、供試体の暴露面以外を防水加工した。供試体の暴露期間終了後は現地から分析室まで運び、モルタルを粉碎後、塩分量の測定を行った。測定方法はJCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」に基づき試料の処理を行い、イオン電極により塩化物イオン量の測定を行った。観測点は34地点の海岸に配置し、砂浜幅、消波施設(消波ブロック)の有無の違いを把握できるように選定した。

(3) 飛来分塩分の発生から構造物表面に到達する飛来塩分の数値シミュレーションモデルの開発を行った。

数値モデルでは、構造物周辺の波浪と風の場合を含めた飛来塩分の発生から構造物表面の到達までを統合したモデルの構成とした。具体的には、海域の波浪、大気中の風況、海域の波動場からの飛来塩分の発生過程、飛来塩分の輸送・到達過程を統合したものである。飛来塩分の発生・輸送・到達過程は、飛来塩分を粒子として取り扱う方法で計算を行った。海面上で発生した飛来塩分粒子は、既往研究で報告されているような大気中で慣性力と風の乱れによる浮力、粒子の自重が釣り合った状態で分布していると仮定し、海面上で経験式にもとづいた鉛直分布となるようにモデル化した。

大気中の飛来塩分粒子の粒径による構造物表面への到達過程の違いを確認するために、飛来塩分の粒径を仮想的に変化させた数値実験を行った。対象とした橋梁は、新潟県上越地方に位置する名立大橋であり、2006年

2月10日に実施された既往研究の現地観測結果の風速・風向条件を再現した。飛来塩分の粒径は、直径10~110 μm の範囲で変化させることとした。

(4) 高度な境界条件を用いたコンクリート中への塩分浸透過程の数値解析による予測を行った。

これまでの研究で開発した構造物表面への到達塩分量の予測手法を利用し、その計算結果を用いてコンクリート中に浸透する塩分量の予測を行った。実際の計算では、表面塩分量に直接影響を及ぼす外部環境条件として到達塩分量と降雨による洗い流し効果を考え、それらの時系列変化と実構造物中の塩分浸透量の予測を行った。計算モデルは、1次元拡散方程式モデルであり、到達塩分量および降水量を時系列で考慮して計算するものである。計算全体の流れは、事前に気象・海象条件から2時間間隔のコンクリート表面の到達塩分量および降雨による洗い流し量を算定しておき、それらを計算に時系列で入力した。

計算結果の妥当性を確認するために、実構造物から採取したコア供試体の塩分浸透量の結果を取得し、計算結果との比較を行った。コア供試体は、日本海沿岸の過酷な塩害環境下で建設から10年程度経過した構造物から採取したものであり、表面から5cm程度の浸透塩分量の分析結果を計算結果と比較した。

(5) 飛来塩分の数値シミュレーションモデルを導入したCIMの構築と構造物への維持管理への有効性について確認を行った。

研究開始当初の計画では、地理情報システム(GIS)を用いて現地観測結果などをデータベースとして整理する予定であったが、近年、実務分野ではCIMの利用が推奨されている。そのため、地理情報システムよりCIMによるデータ管理および活用について研究を進めるほうが有効と考えられることから、研究計画を一部変更しCIMの構築を行った。

塩害環境下におかれた構造物を例に、現在試行されているCIMに飛来塩分シミュレーションの数値解析技術を組み合わせ、構造物の維持管理へのCIMの応用の可能性とその有効性の検討を行った。維持管理に適用可能なCIMとして3つの項目に分割して構築し、それらを統合した。1つ目は設計・施工段階のデータから仮想構造物を管理するための3次元空間の観覧システムである。構築した構造物の観覧を3次元空間で可視化できるようにシステムを作成した。2つ目は、数値シミュレーションに必要な入力データを管理するためのデータ管理システムである。3つ目は数値シミュレーションモデルのCIMへの統合部分であり、コンクリート内部の塩分の浸透モデルをCIMに統合した。このモデルの境界条件となる構造物表面の到達塩分量は、飛来塩分算定図を用いる方法で計算した。この方

法は、3次元の風の場と飛来塩分シミュレーションによる計算を行い、構造物の各位置の飛来塩分と風、波浪の関係を整理するものである。

4. 研究成果

(1) 数値シミュレーションを援用した橋桁各部位の飛来塩分の再現・予測手法を提案し、数時間単位の風況及び波浪条件を用いて5年間の橋桁各部位に到達する塩分量の再現計算を行った。さらに、5年間実施した飛来塩分及び風況の現地観測結果を整理し、その関係について検討した。その結果、5年間の観測結果から毎年の飛来塩分の変動傾向は大きく差がないこと、飛来塩分は風況及び波浪条件に大きく影響を受けて変化していることが示された。さらに、図1に示すように、開発した手法で計算した飛来塩分の到達量の結果は、土研式捕集箱で観測された1ヶ月単位の観測結果をよく再現できていることが確認できた。これより、飛来塩分の数値シミュレーションの結果から作成された飛来塩分の算定図を用いることで、長期的および橋桁各部位に到達する飛来塩分量を再現できることが明らかになった。

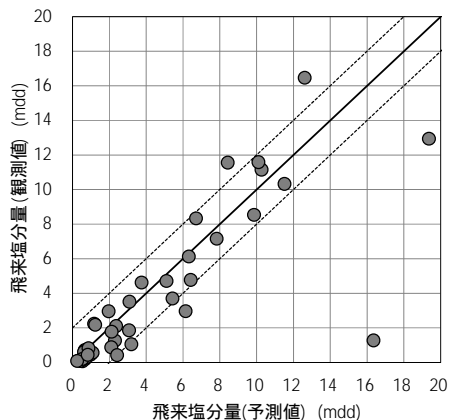


図1 計算結果と観測結果の比較

(2) 新潟県沿岸で飛来塩分の現地調査を実施し、広域を対象とした飛来塩分と海岸特性の変動について確認するとともに、海岸特性に応じた飛来塩分量の算定手法の開発を行った。さらに、海岸環境を数値化する簡易的な方法として、空中写真を利用する手法についても検討を行った。その結果、図2に示すように、塩分量は海岸からの距離が同様の場合でもその値は大きく異なること、海岸の状況に応じて変化することが示された。新潟県沿岸に位置する30地点以上の海岸で同時に現地観測を行った結果、消波施設の設置の有無により飛来塩分量が変化することが確認でき、消波施設の設置された海岸のほうで塩分量が2倍程度増加することが明らかになった。さらに、空中写真を利用して海岸環境(砂浜幅、消波施設までの距離)を数値化することで、各海岸状況に応じた飛来塩分量を算

定する手法を確立することができた。

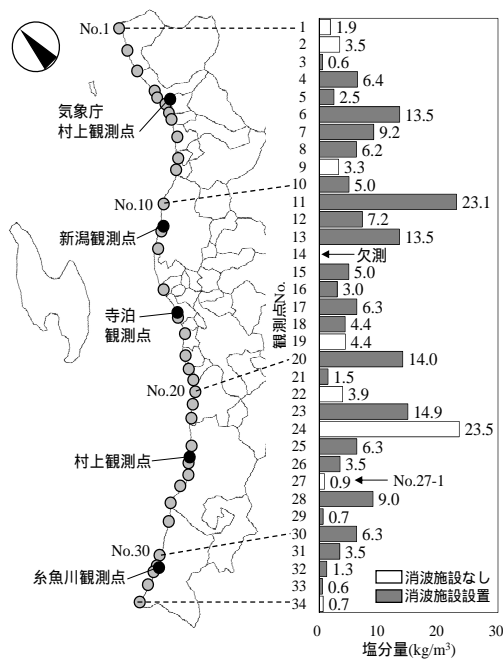


図2 新潟県沿岸の飛来塩分量の観測結果

(3) 海域からの飛来塩分の発生から構造物表面へのその到達過程までを数値解析によって評価する手法の検討を行った。その結果、図3のような波浪および風の場、海岸近傍の飛来塩分の発生から輸送・到達過程を統合した数値モデルを用いることで、飛来塩分の発生から構造物表面への到達過程までを予測できることが示された。さらに、大気中の飛来塩分粒子の粒径を変化させた数値実験を行うことで、塩分粒子の粒径の違いによる構造物表面への到達量の変化を把握することができた。

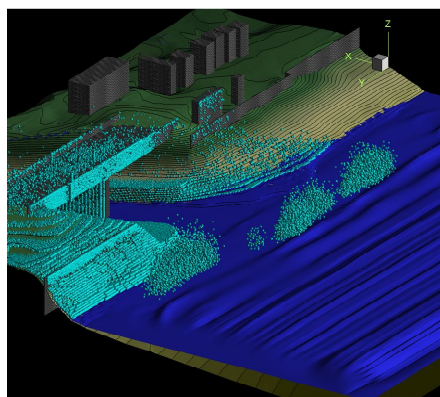


図3 構造物表面への飛来塩分の数値解析

(4) 実構造物における外部環境条件の時系列変化が塩分浸透量に与える影響について検討を行った。その結果、実構造物における塩分浸透量は、到達塩分量と降雨による洗い流しの時系列的な影響を受けて変化していることが確認できた。さらに、外部環境条件

として到達塩分量と降雨による洗い流し効果を考慮した計算モデルの計算結果から、外部環境条件の時系列変化とコンクリート中の塩分浸透量の関係について説明できることが示された。図4は、構造物表面の塩分量を2時間間隔で変化させた条件で、コンクリート中の浸透塩分量の分布を再現計算したものである。図に示すように、浸透過程の計算の境界条件となる構造物表面の塩分量に応じて、コンクリート内部の塩分の浸透過程が変化している状況が再現できている。

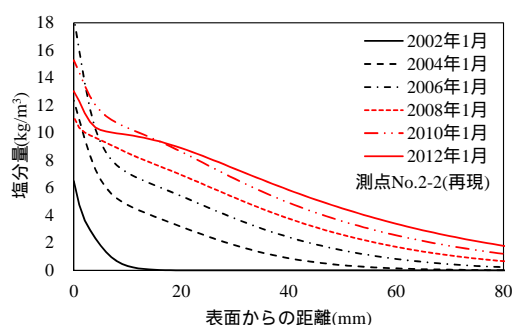


図4 塩分浸透量の時系列変化

(5) 塩害環境下に建設されたコンクリート構造物を例に、維持管理へのCIMの応用の有効性を検証した。その結果、飛来塩分の数値シミュレーションを導入したCIMを用いて実構造物を対象とした維持管理の想定計算を行った結果、数値シミュレーションを導入したCIMが構造物の維持管理に有効的であることが確認できた。さらに、CIM内で管理しているデータを点検に基づき随時更新し、将来予測に用いる数値シミュレーションのパラメータを修正していくことで、精度の高い予測が可能となることが示された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

中村文則、井野裕輝、大原涼平、下村 匠、空中写真を利用した海岸環境の数値化とそれに応じた飛来塩分量の算定手法の開発、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.39、No.1、2017 (掲載決定)

中村文則、小松 駿、大原涼平、下村 匠、コンクリート構造物の維持管理へのCIM応用の可能性と有効性の検証、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、査読有、第16巻、2016、pp.311-316

中村文則、下村 匠、原田健二、大原涼平、外部環境条件の時系列変化を考慮した実構造物の塩分浸透量に関する研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.38 No.1、2016、pp.855-860

中村文則、下村 匠、生田麻実、細山田

得三、数値シミュレーションを援用した構造物各部位の到達塩分量の予測手法、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.37、No.1、2015、pp.775-780

中村文則、生田麻実、下村 匠、細山田得三、飛来塩分が到達するコンクリートの表面塩分量に関する現地観測と数値解析、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol.36、No.1、2014、pp.880-885

〔学会発表〕(計3件)

中村文則、下村 匠、山口貴幸、大原涼平、井野裕輝、コンクリート構造物の劣化予測システムに関する研究 - 飛来塩分シミュレータによる到達塩分の長期再現解析 -、第2回北陸橋梁保全会議、2016.10.25、報文番号 B-4(6p、web)、新潟グランドホテル(新潟県・新潟市)

中村文則、下村 匠、細山田得三、海域における塩分粒子から構造物表面への到達過程の数値解析、土木学会年次学術講演会概要集、第71回、2016.9.7、V-390、東北大学(宮城県・仙台市)

中村文則、細山田得三、下村 匠、海域の波動場から大気中に放出される海水滴の発生と輸送に関する数値解析、日本混相流シンポジウム講演論文集、2016.8月9日、OS7-D133(USB)、同志社大学(京都府・京都市)

〔その他〕
大学研究室ホームページ
<http://concrete.nagaokaut.ac.jp/>

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
中村 文則 (NAKAMURA, Fuminori)
長岡技術科学大学・工学研究科・助教
研究者番号：70707786
- (2) 研究協力者
細山田 得三 (HOSOYAMADA, Tokuzou)