

# 論文 沿岸域に位置する鉄筋コンクリート構造物の各部材に付着する塩分の数値解析的検討

豊田 颯太\*1・崎原 康平\*2・請舩 慧\*3・富山 潤\*4

**要旨:** 本研究では、沿岸域にある鉄筋コンクリート構造物における各部材の付着塩分を、自作の薄板モルタル供試体を用いて測定するとともに、構造物周辺の風況シミュレーションおよび飛来塩分の粒子拡散シミュレーションを実施した。その結果、付着塩分にばらつきがあるものの解析値は実測値とほぼ同様な傾向を示すことが確認された。また、感水紙試験による西面の付着塩分と風況シミュレーションで得られた風圧との関係にはある程度の相関が認められた。粒子拡散シミュレーション結果の比較では、構造物外側の実測値が解析値より小さく、雨掛りによる洗い流し効果や周辺環境が付着塩分に影響を与える可能性が示唆された。

**キーワード:** 塩害, 飛来塩分, 薄板モルタル供試体, OpenFOAM, ランダムウォーク法

## 1. はじめに

沿岸域から発生する飛来塩分および鉄筋コンクリート構造物における各部材毎の付着塩分を定量的に予測することは、塩害に対する合理的な維持管理や耐久設計の観点からも極めて重要である。

鉄筋コンクリート構造物において、各部材に付着する塩分は、気象条件や周辺環境、さらに構造物の形状・寸法や位置等により、部材毎に異なることが知られている<sup>1)</sup>。また、2022年11月に改定された建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2022<sup>2)</sup>では、部材毎に劣化環境区分が定められており、部材毎に環境外力や劣化速度を詳細かつ定量的に把握する重要性は、今後さらに高まることが考えられる。

以上の背景より、著者らこれまでに柱や梁および庇から構成されている単純な鉄筋コンクリート構造物を対象に、自作の薄板モルタル供試体（以後、供試体と略す）を用いて各部材の付着塩分に関する検討を行っている<sup>3)</sup>。その結果、季節毎に異なる風況（風向、風速）や周辺環境、さらに部材の寸法・位置が各部材毎に付着する塩分を与える影響について述べている。

一方、各部材の付着塩分を数値解析的に把握する研究も数多く行われている<sup>例えは4)</sup>。しかし、数値解析的な研究については、そのほとんどが土木構造物を対象としており、鉄筋コンクリート構造物における各部材に付着する塩分に関する検討は数少ないのが現状である。

そこで本研究では、沿岸域にある鉄筋コンクリート構造物（以後、構造物と称す）における各部材に付着塩分を、供試体を用いて測定した。また、風況や周辺環境、部材の形状・寸法・配置等が各部材の付着塩分

に与える影響を把握するために、構造物周辺の風況シミュレーションを行った。さらに、得られた風速場を用いて飛来塩分粒子を模擬した粒子拡散解析を実施し、各部材に付着する塩分の検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 構造物の設置場所と観測期間

本研究では、沖縄県本島北部の東シナ海に面した国頭村辺野喜にある構造物を対象に付着塩分の観測を行った（図-1参照）。なお、対象構造物は柱12本、梁14本、および一部の庇からなる単純な構造である。

暴露期間は約3~5ヶ月間とし、冬季の3期間を対象に暴露試験を実施した。表-1に暴露期間の詳細を示す。

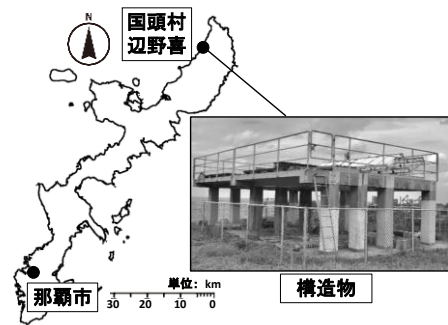


図-1 対象構造物

表-1 暴露期間

期間	第1期	第2期	第3期
設置日	2020/11/5	2021/10/1	2022/1/2
回収日	2021/4/2	2022/1/2	2022/4/1
観測日数	149日	93日	89日

\*1 琉球大学大学院 理工学研究科工学専攻 (学生会員)

\*2 琉球大学 工学部工学科准教授 博士(工学) (正会員)

\*3 琉球大学大学院 理工学研究科工学専攻 (学生会員)

\*4 琉球大学 工学部工学科教授 博士(工学) (正会員)

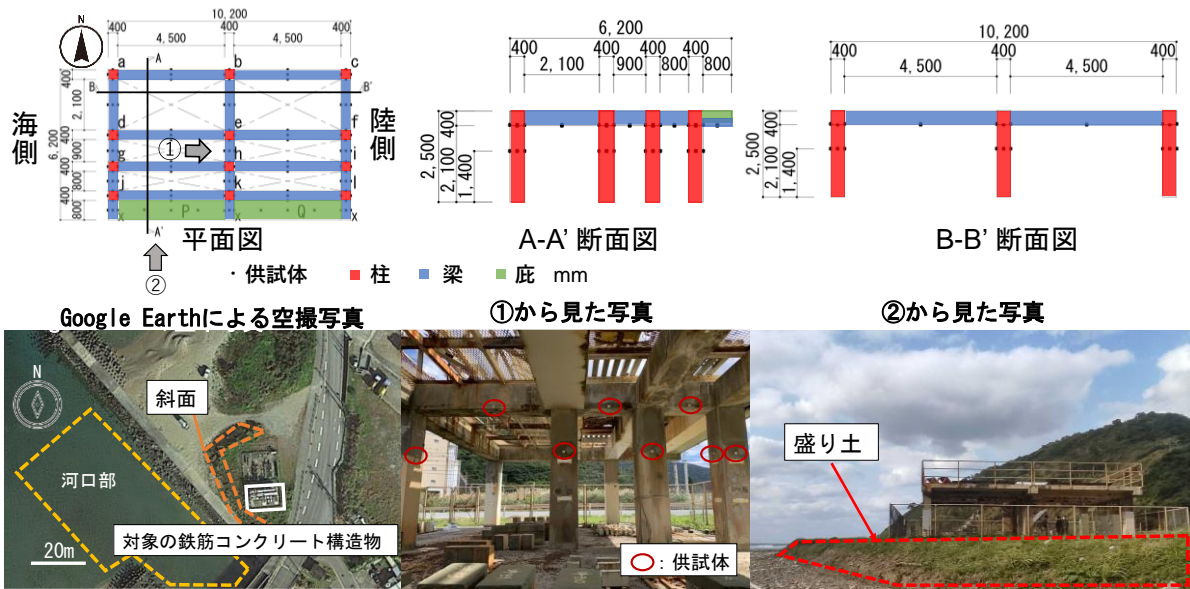


図-2 対象構造物の平面図および供試体設置状況

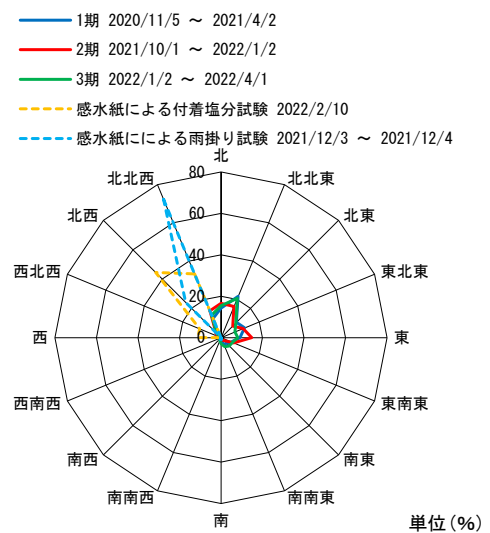
## 2.2 供試体概要

供試体は、セメントに普通ポルトランドセメント、細骨材にセメント強さ試験用標準砂を使用し、水セメント比は60%とした。供試体の寸法は、40×40×10mmとし、40×40mmの1面以外の5面をアルミテープで覆い、1面からのみ塩分が浸透するものとした。

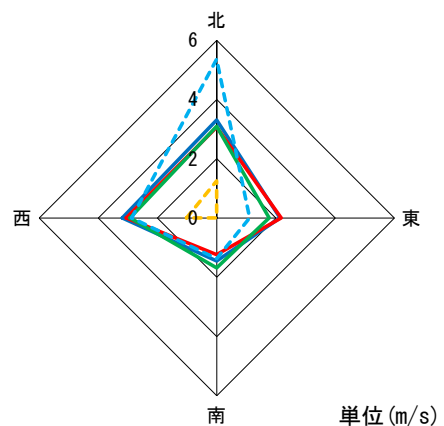
## 2.3 暴露期間中の風況

本研究では、対象構造物の部材に付着する塩分の傾向を把握するため、現地の風況について調査を行った。2021年4月時点で対象構造物付近に風向風速計を設置しているが、暴露期間の第1期は現地で風況の観測を行えなかったため、現地と似た風況である与論島のデータを参考にした。なお、与論島の風況データは気象観測所が公開しているアメダスから取得した。与論島の風況は現地の風況と比べ、平均風速が大きくなることを確認している<sup>9)</sup>。そのため、与論島の平均風速を北風では1/1.65倍、西風では1/1.17倍、南風では1/2.32倍、東風では1/1.79倍とそれぞれの値を補正して使用した。暴露期間毎の風配図、平均風速および2.4節、2.5節で述べる感水紙による雨掛り試験および付着塩分試験期間中における現地で観測された風況を図-3にそれぞれ示す。また、図-3(b)は供試体を4方位に貼り付けているため、それに合わせて16方位の風を4方位にベクトル合成することで変換して表示した。

図-3(a)の風配図に着目すると、各暴露期間中は北北東の風の割合が最も高く、北の風がその次に多い結果であった。また、平均風速に着目すると、東や南の風が約1.5~2m/sに対し、北や西の風は約3m/sと大きいことが分かる。これは、各暴露期間が冬季から春季



(a) 風配図



(b) 平均風速

図-3 暴露期間毎の風配図と平均風速

であり、北よりの季節風の影響が大きいと考えられる。

## 2.4 供試体による暴露試験結果

図-4に、各期における各部材の付着塩分を示す。なお、暴露試験は4方位および梁や庇の下部にも供試体を設置し、付着塩分を測定したが、対象構造物の北西側に海があることや暴露期間中、北・西風が卓越していることから、本検討では北・西の暴露試験結果について検討を行うこととした。

全体的な傾向として、若干ばらつきはあるものの、北および西面における柱や梁の付着塩分の相対的な増減は、各暴露期間によらず同様な傾向であった。また、柱の付着塩分に着目すると、第3期の西(図-4(b)参照)を除いて、北面および西面によらず、柱eの付着塩分が大きい。一方、構造物の外側北面の柱a, b, c(図-4(a)参照)や西面の柱a, d, g, j(図-4(b)参照)の付着塩分は小さい。これは、雨掛りによる洗い流しの影響が考えられた。そこで本研究では、感水紙による各柱の雨掛り試験を実施した(図-5参照)。感水紙は市販品を使用し、寸法を76×26mmとした。この感水紙は、液滴が付着すると濃青色に変化するものである。観測を行った感水紙は二値化処理し、画像解析ソフトを用いて解析を行った。同図より、柱の位置による雨掛りの差異が確認された。

## 2.5 感水紙による付着塩分試験

本検討の事前の予備実験において、梁の付着塩分が柱より大きいことが確認された。一要因として、部材の高さが付着塩分に影響を与えていると考えられた。

そこで本研究では、高さによる付着塩分の違いを、感水紙を用いて検討した。具体的には、図-6左図に示すように、柱aの北面および西面の高さの異なる3地点、計6地点に感水紙を貼り付け、暴露を行った。貼り付け高さは、地面から70cm, 140cm, 210cmの位置とした。観測は、供試体による暴露試験の第3期の暴露期間にあたる2022年2月10日の1時間45分で行った。なお本検討では、感水紙の濃青色に呈色した部分を海塩粒子と捉え、測定した。

感水紙試験の結果を図-6右図に示す。ここで本検討では、海塩粒子の総面積を用いて検討を行った。

同図より柱aの北側は中, 上, 下の順で総面積が大きくなっている。また西側は, 上, 中, 下の順で総面積が大きくなっている。どちらの面も柱の下側は総面積が最も小さいことから海塩粒子の付着量が少ないことが確認された。この要因として、図-2右下に示すように構造物が設置されている位置は、海岸から約2m高いため、海から吹く地表面付近の風は吹き上げられ、構造物の柱の下部には風が吹き付けにくい状態になっている可能性がある。

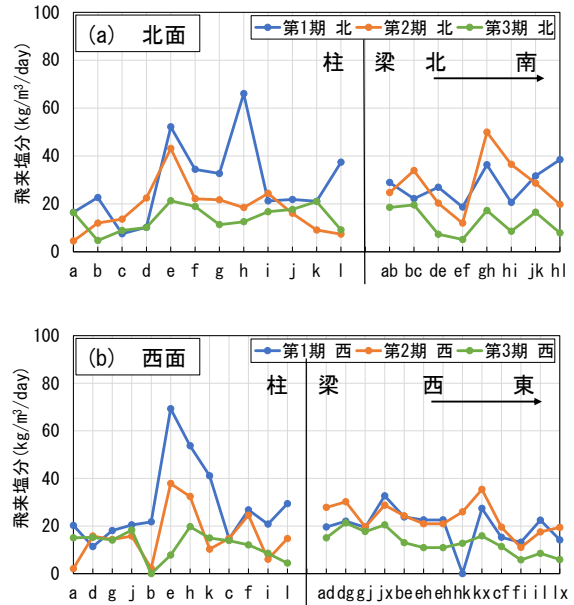


図-4 各暴露期間中における付着塩分

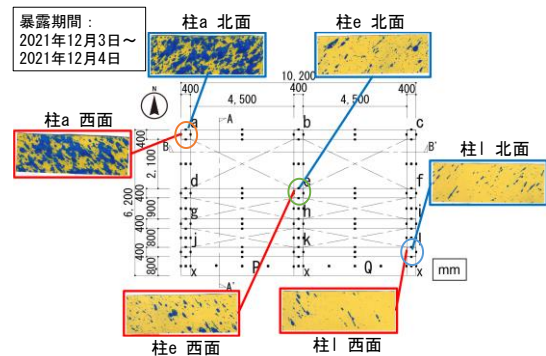


図-5 感水紙による雨掛り試験結果

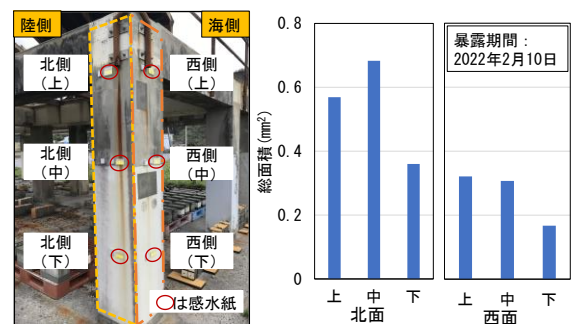


図-6 感水紙による付着塩分試験

上記の要因について、より詳細に検討するため、次章では高さの違いによる付着塩分量の差異について風況シミュレーションを実施し、風況の検証を行なった。さらに得られた風況シミュレーションで得られた風速場を用いて海塩粒子拡散シミュレーションを実施し、各部材の付着塩分量の検討を行った。

### 3. 飛来塩分の拡散・付着シミュレーションについて

本研究における塩分の拡散・付着シミュレーションでは、2段階に分けて解析を行った。第1段階では、OpenFOAM<sup>6)</sup>による対象構造物周辺の風速場の解析を行った。第2段階では、ランダムウォーク法<sup>7)</sup>を用いて飛来塩分粒子の拡散および付着解析を行った。

#### 3.1 解析領域および解析条件

解析領域を図-7に示す。対象構造物に流れる暴露期間中卓越した北・西風に影響を与えると考えられる高さ約2mの盛り土を簡易的に模したモデルを中心に32×46×10mの空間を解析領域とした。飛来塩分は対象構造物の北西に面する海から発生するため、西風、北風、北西風の3ケースで解析を行った。図-8に一例として西風の粒子発生位置を示す。粒子は対象構造物から5m離れた位置の幅3m、高さ4mの領域でランダムに発生させた。解析条件を表-2に示す。ここで、風速は既往研究<sup>9)</sup>を参考に暴露期間中の与論島におけるアメダスの平均風速データを元に現地の風速とした。

#### 3.2 風速場解析について

風速場の解析で使用したOpenFOAM<sup>6)</sup>は、オープンソースの数値流体解析コードで、様々な流体計算ソルバーを有している。本研究では、SIMPLE法ソルバーを利用して非圧縮流体の定常解析を行った。なお、飛来塩分粒子の拡散・付着シミュレーションに用いた風速場は、定常状態を確認した30秒時点のものとした。

#### 3.3 飛来塩分の移流・拡散・付着解析

本研究では、飛来塩分粒子の拡散・付着過程の解析において、粒子拡散手法の1つである3次元ランダムウォーク法<sup>7)</sup>を用いた。以降では、ランダムウォーク法のアルゴリズムの概要について述べる。

##### (1) 粒子位置の更新(移流・拡散)

3次元乱流内のあるステップ( $i$ ステップとする)の粒子の位置を $x_i(x, y, z)$ とすると、次ステップでの粒子の位置は、次式で表される。

$$x_{i+1} = x_i + (\bar{U} + u_{i+1})\Delta t \quad (1)$$

ここで、 $\Delta t$ は時間刻み(s)であり、 $\bar{U}$ は平均風速(m/s)で風速場解析から得られた風速を用いる。このとき、 $u_{i+1}$ を乱流速度(m/s)といい次式で表される。

$$u_{i+1} = \alpha u_i + \lambda_{i+1} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha$ はラグランジュの相関関数といい、

$$\alpha = \exp\left(-\frac{\Delta t}{T_L}\right) \quad (3)$$

で表される。ここで、 $T_L$ はラグランジュの時間スケールである。また、 $\lambda_{i+1}$ を乱流統計量といい、

$$\lambda_{i+1} = (1 - \alpha^2)^{\frac{1}{2}} \sigma_u \eta_{i+1} \quad (4)$$

で表される。ここで、 $\eta_{i+1}$ は独立した標準正規の確率変

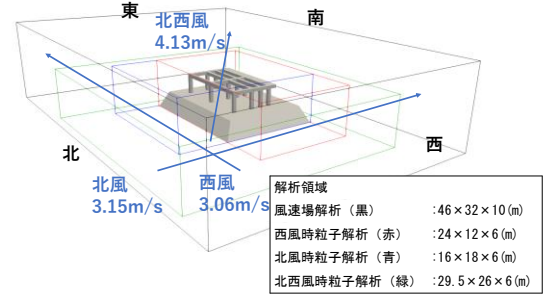


図-7 解析領域

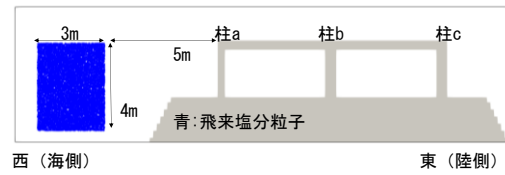


図-8 飛来塩分の粒子発生位置(西風)

表-2 解析条件

項目	詳細
風速 (m/s)	西:3.06, 北:3.15, 北西:4.33
メッシュ数 (個)	3,349,497
時間刻み幅 (s)	風速場:0.1, 拡散:0.01
解析時間 (s)	風速場:30, 拡散:30
動粘性係数 (m <sup>2</sup> /s)	$1.5 \times 10^{-5}$
流体密度 (kg/m <sup>3</sup> )	1.0
飛来塩分粒子数 (個)	20,000

数、 $\sigma_u$ は粒子の拡散を表す標準偏差を表しており、粒子の拡散に影響を与えている。 $\sigma_u$ は次式で表される。

$$\sigma = \frac{\sqrt{2K \cdot t}}{t} \quad (5)$$

ここで、 $t$ は時間(s)、 $K$ は乱流拡散係数(m<sup>2</sup>/s)といい、

$$K = \frac{\beta}{3}(u^2 + v^2 + w^2)t \quad (6)$$

で表され、本研究では、既往研究<sup>4)</sup>を参考に比例係数 $\beta$ を0.1とした。

##### (2) 付着判定

本研究では、既往研究<sup>4)</sup>を参考に、簡易的に付着塩分量を評価するため、洗い流し等の影響を考慮しないものとした。そこで、対象構造物に衝突した粒子をすべて付着したものとする完全付着モデルを用いた。

##### (3) 粒子の塩分濃度と沈降速度

本研究において、対象構造物は海域から約40m離れており、対象構造物に到達する塩分飛沫の質量は小さく、沈降速度の影響が少ないと考えられるため沈降速度を無視できると仮定した。また、粒子の塩分濃度は一定であると仮定し、付着塩分量は付着粒子数に依存するものとした。

### 3.4 解析結果および暴露試験結果の比較

図-9 に、OpenFOAM で解析した西風の風速ベクトルを示す。図-9 の赤点囲み部に着目すると、海側（西側）からの風が盛土の影響を受け、柱 a 下部付近で渦を巻く流れとなっている。また、構造物の内側では柱や梁の影響を受け、複雑な流れになることがわかる。

図-10 に、拡散・付着シミュレーション結果の一例として、西風の結果を示す。同図より、粒子が移流・拡散し、対象構造物へ付着する様子が確認できる。また、柱 a 下部の風速場は渦を巻く流れとなっていたため、柱 a 下部に粒子が付着しない様子を再現できた。

図-11 (a) に、柱 a の西面における感水紙による付着塩分試験結果と風況シミュレーションによる風圧分布および粒子・付着シミュレーションで得られた飛来塩分粒子の付着状況を示す。また、同図 (b) は北風に対する各結果を示す。付着状況はどちらも 30 秒時点のものとした。上述したように、柱 a 下部では渦を巻く流れであり、風速の低下がみられる。これにより、柱 a 下部の感水紙による付着塩分試験で得られた粒子面積、風圧分布および付着粒子数が小さくなったものと考えられる。一方、柱 a 上部付近では、各面に対してほぼ垂直に風があたっているため（図-9 参照）、上部の風圧は大きいことがわかる。

図-12 に、感水紙による付着塩分試験、風圧、付着粒子数を正規化した結果を示す。正規化は、単位面積あたりの各値を、単位面積あたりの最大値（感水紙試験では単位面積あたりの粒子面積の最大値、風圧は単位面積あたりの最大風圧、付着粒子数は単位面積あたりの最大付着粒子数）で除することで整理した。同図 (a) より、風速場解析で得られた柱 a 西面の上段および中段の風圧は、感水紙の結果と非常に良い相関があることが確認された。しかし、下段における風圧は、感水紙の結果より小さくなることがわかった。一方、北面の結果は、上段および中段の風圧と感水紙の結果に相関は確認されなかった。この理由については、今後詳細の検討を行う予定である。

以上のことから、本研究の範囲において、感水紙の結果と風圧の関係については、西面では、ある程度の相関が認められることが確認された。

図-13 に、各部材の北・西面の暴露試験結果と拡散・付着シミュレーションで得られた付着粒子数の比較を示す。なお、同図において、暴露試験結果は暴露期間で得られた結果を平均した。また、解析結果は、各風速で得られた結果を合成した。さらに、図-12 と同様に各結果に対して正規化を行った。

図-13 (a) の柱の北面に着目すると、構造物外側の柱 a, b, c において、実測値が解析値より小さくなってい

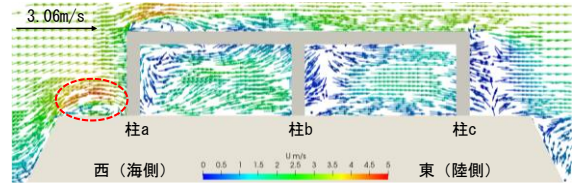


図-9 風速場(西風)

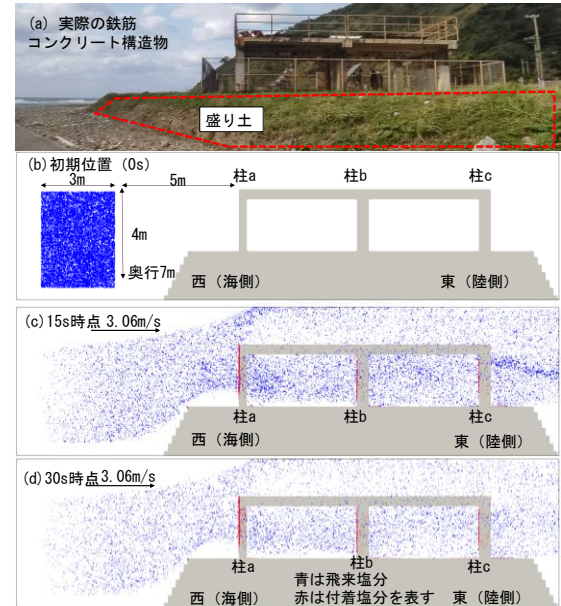


図-10 飛来塩分の移流・拡散・付着状況(西風)

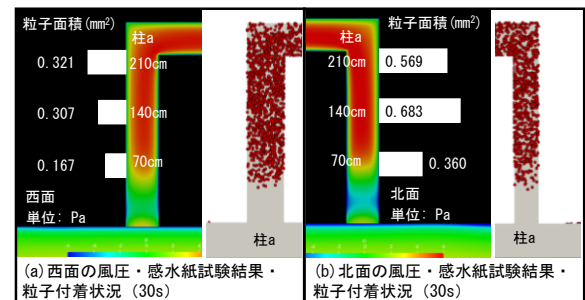


図-11 感水紙・付着粒子・風圧分布の比較

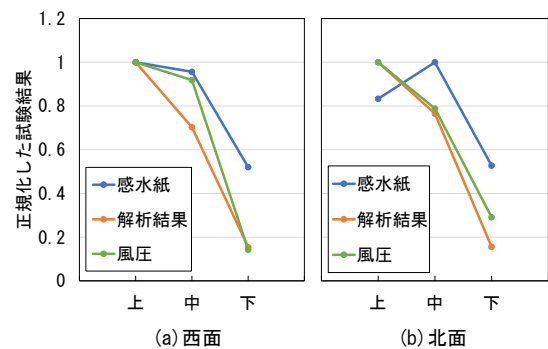


図-12 正規化した各試験・解析結果の比較

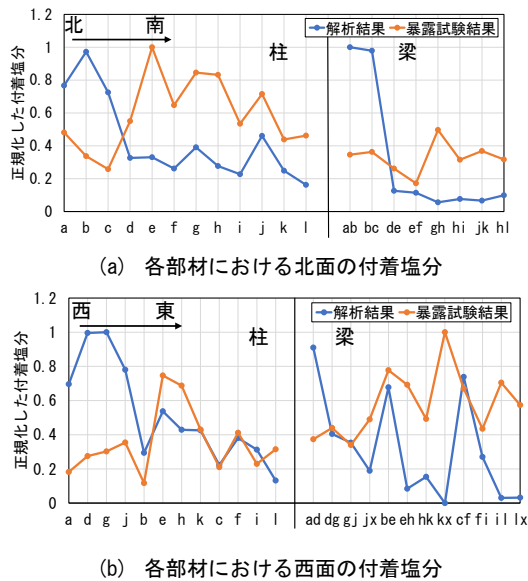


図-13 解析結果と実験結果の付着塩分比較

ることがわかる。これは、雨掛りによる洗い流しの影響が考えられる。一方、構造物内部の柱において実測値が解析値より大きい。これは構造物北側の地形や周辺環境が関係していると考えられる。図-2の空撮写真からも分かる通り、構造物北側には別の暴露施設があり、平坦な地形となっているが、本解析では簡易的に構造物北側も西側同様に傾斜を設けた地形にしたため、その形状の差異が構造物周囲の風況に影響し、解析値と実測値に乖離を生じさせたと考えられる。図-13(a)の南東側に位置する梁北面においても実測値と解析値に乖離がある。これは、最多風向である北北東などの風によって、構造物周囲に浮遊している飛来塩分粒子が輸送された可能性が考えられる。

図-13(b)の柱の西面に着目すると、北面同様に、構造物の最外部に位置する柱 a, d, g, j は雨掛りによる洗い流しの影響を受け実測値が小さくなったと考えられる。その一方、構造物の中央部や陸側に位置する柱においては良好な相関が認められた。同図の梁西面に着目すると、特に構造物の南側の梁（梁 hk, kx, il, lx 等）において実測値と解析値に差が生じている。これは、飛来塩分が構造物南西側の河口部（図-2 左下参照）から供給され、浮遊した粒子が西風によって南側に位置する梁に付着したと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究で得られた知見と今後の課題を以下に示す。

- (1) 供試体による暴露試験の結果、柱の付着塩分は構造物の外側では小さく、構造物内部では大きくなっている。これは、雨掛りによる洗い流しの影響を受け、付着塩分量が小さくなっていると考えられる。

- (2) 感水紙による付着塩分試験の結果、柱西面の付着塩分は、柱の上・中段では大きく、下段では小さくなることが確認された。また、粒子拡散・付着解析結果も同様な傾向を示しており、風速場解析の風圧と感水紙試験結果はある程度の相関が認められた。
- (3) ランダムウォーク法による飛来塩分の拡散・付着解析の結果、北面では、実測値と解析値に乖離が生じていた。これは、降雨による洗い流しや周辺環境による影響が考えられる。一方、構造物中央部や陸側に位置する柱の西面においては、解析値と実測値で同様の付着塩分量の分布が確認できた。

今後の課題として、降雨による洗い流し効果や、構造物周辺の地形や風況のより詳細なモデルを考慮した数値シミュレーションを行う予定である。

#### 謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費（基盤研究(C)）「AIと数値シミュレーションを統合した塩害環境予測技術の開発」（研究代表者：崎原康平，課題番号：21K04335）の一環として行ったものである。記して感謝の意を表す。

#### 参考文献

- 1) 材料劣化が生じるコンクリート構造物の維持管理優先度研究小委員会(342 委員会):委員会報告書およびシンポジウム講演概要集，コンクリート技術シリーズ No.98，土木学会，2012.
- 2) 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2022，日本建築学会，2022.11
- 3) 請舛慧，崎原康平，豊田颯太，東舟道 裕亮：周辺環境を考慮した沿岸域の鉄筋コンクリート構造物における各構造物材に付着する塩分に関する研究，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，Vol.22，pp.321-326，2022.
- 4) 富山潤：コンクリート橋上部工に付着する飛来塩分に関する数値解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.874-879，2014.
- 5) 請舛慧，崎原康平，中村文則，滝勇太：長期観測データに基づく沖縄本島海岸付近の飛来塩分予測における機械学習の適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.43，No.1，pp.544-549，2021.
- 6) OpenFOAM 参照：<https://www.openfoam.com/>（閲覧日：2022年12月23日）
- 7) LEY,A.J.,:A random walk model of two dimensional diffusion in the neutral surface layer, Atmospheric Environment, No.16, pp.2799-2808, 1982