

論文 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

富山 潤^{*1}

要旨：飛来塩分によるコンクリート構造物の塩害劣化は、同一構造物においても気象条件、周辺環境、さらに構造物の形状・寸法などにより、部材、部位ごとに劣化の程度が異なることが知られている。この理由として、海から発生し、輸送される飛来塩分の構造物への付着量が部材・部位ごとに異なることによるものと考えられる。そこで本研究では、コンクリート橋上部工（主桁）を対象に、数値解析的検討を行った。解析の妥当性を評価するために、実橋梁のガーゼ拭き取り法により付着塩分量調査を実施し、両結果を比較検討した。その結果、両結果は定性的によく一致することが確認でき、本手法の妥当性が示された。

キーワード：コンクリート構造物、付着塩分、ランダムウォーク法、ガーゼ拭き取り法

1. はじめに

飛来塩分によるコンクリート構造物の塩害劣化は、同一構造物においても気象条件、周辺環境、さらに構造物の形状・寸法などにより、部材、部位ごとに劣化の程度が異なることが知られている¹⁾。この理由として、海から発生し、輸送される飛来塩分の構造物への付着量が部材・部位ごとに異なることによるものと考えられる。したがって、コンクリート構造物の表面に付着した塩分量を定量的に評価することが、維持管理の面からも重要課題の一つである。

飛来塩分に起因した塩害に関する研究は過去に多く行われている。文献1)では、部材・部位ごとの環境外力（環境作用）の空間分布や劣化速度の空間分布に着目がされている研究について整理され、部材・部位ごとに環境外力および劣化速度などを把握することの重要性が述べられている。その中では数値解析的な研究についても調査されているが、構造物へ周辺の飛来塩分量の評価に関する研究は過去にいくつかあるものの^{2)~6)}、構造物への付着量の評価に関する研究の殆どが鋼構造物を対象としたものであり、コンクリート構造物を対象とした研究は少ないのが現状である。その理由としては、鋼構造物の場合は付着塩分がそのまま耐久性照査に用いられるのに対し、コンクリートの場合は、付着塩分と耐久性照査に用いる表面塩化物イオン濃度との関係が明確ではなく、付着塩分がそのまま耐久性照査に用いることができないためである。しかし、コンクリート構造物においても環境作用の強度分布を部材・部位ごとに把握することは維持管理において重要である。

本研究は高精度な飛来塩分の数値技術の開発を目指すものであり、本論文では、コンクリート橋梁上部工を対象に、数値解析およびガーゼ拭き取り法⁷⁾により付着

塩分量を調査し、本手法の妥当性を定性的に評価した。

2. 粒子拡散モデル

2.1 解析概要

本解析手法は、2段階に分かれる。具体的には、有限要素法により構造物周辺の流れ場（風速場）を解く第1ステップと、第1ステップで得られた流れ場を用いて粒子拡散手法の一種であるランダムウォーク法⁸⁾により飛来塩分粒子の移流・拡散を解く第2ステップからなる。

図-1に解析フローを示す。

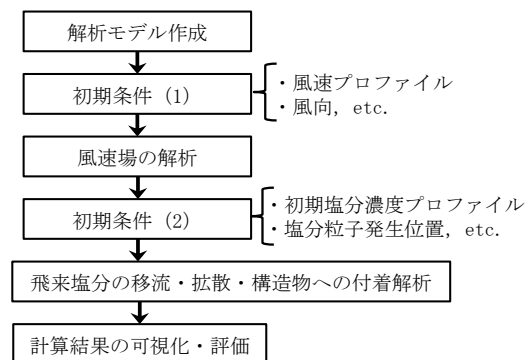


図-1 解析フローチャート

2.2 風速場の解析

構造物周辺の流れ場は、ADVNETURE_Fluid_Tet⁹⁾を用いて解いている。ADVENTURE_Fluid_Tet は、並列計算環境における大規模から中規模解析のための流体解析モジュールである。以下にその概略を述べる。

非圧縮性流体の運動方程式は、以下の連続の式と、Navier-Stokes 方程式および境界条件によって支配されている。

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

^{*1} 琉球大学 工学部環境建設工学科准教授 博士（工学）（正会員）

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u - f \right) - \nabla \cdot \sigma = 0 \quad (2)$$

ここで、 u は流速ベクトル、 ρ は密度、 f は物体力ベクトル、 σ は応力テンソル、 ∇ は微分演算子、 t は時間である。

ADVENTURE_Fluid_Tet は、速度と圧力を同じ次数で補間した四面体要素(P1-P1)を用いた同次補間法¹⁰⁾により有限要素近似し、未知変数の離散化を行う。その際、安定化有限要素法である SUPG/PSPG¹⁰⁾を適用し、上述した支配方程式から速度および圧力に関して次式を得る。

$$(M + M_\delta) \frac{\partial u}{\partial t} + (N + N_\delta) u + Ku - (G + G_\delta) p = 0 \quad (3)$$

$$G^T u + M_\varepsilon \frac{\partial u}{\partial t} + N_\varepsilon u + G_\varepsilon p = 0 \quad (4)$$

ここで、 M , N , K , G , G^T はそれぞれ質量、対流、拡散、勾配、発散行列を表し、添え字 δ , ε はそれぞれ SUPG 法、PSPG 法に起因することを示している。なお、時間方向は Crank-Nicolson 法により離散化し、速度および圧力を陰解法により直接解いている。

2.3 飛来塩分の移流・拡散・構造物への付着解析

本研究では飛来塩分の移流拡散モデルとして粒子拡散手法の一種である 3 次元ランダムウォーク法を用いた。このモデルは、発生源から追跡粒子を放出し、個々の粒子が平均流と乱流によって運ばれるとして、その後の粒子の分布を、3 次元空間で計算するものである。

(1) 粒子位置の更新（移流・拡散）

3 次元乱流で i ステップ目の粒子の位置 $x_i(x,y,z)$ とし、それぞれの速度を $u_i(u,v,z)$ とする。その特徴として、粒子の速度を求める際に、乱流統計量により粒子の拡散性状を表現する。以下にそれぞれの粒子の位置と速度の関係を示す。

発生した粒子位置の更新（移動・拡散）を次式で表す。

$$x_j^{i+1} = x_j^i + u_j^i \Delta t \quad (5)$$

ここで、 Δt は時間ステップである。また、 $i+1$ ステップ後の粒子速度を次式に表す。 j は座標を表す。

$$u_j^{i+1} = U_j^i + \alpha_j^i + \lambda_j^{i+1} \quad (6)$$

ここで、 U_j^i は平均的な風速であり、Adventure_Fluid から得られる流れ場を用いる。 λ_j^{i+1} は乱流統計量、 α はラグランジュの相関関数である。また、乱流統計量は次式となる。

$$\lambda_j^{i+1} = (1 - \alpha^2)^{1/2} \sigma_j \cdot \eta_j^{i+1} \quad (7)$$

粒子は平均値がゼロの正規分布に従うとしている。 σ_j は粒子拡散の標準偏差を表し、粒子の拡散性状を表現するものである。また、 σ は次式に示す Fick 形の拡散形式を持つものとしてモデル化を行っている。

$$\sigma = \sqrt{2Kt} \quad (8)$$

ここで、 K は乱流拡散係数であり、粒子速度に依存すると仮定し、次式から求めている。

$$K = \frac{\beta}{3} (u^2 + v^2 + w^2) \cdot t \quad (9)$$

ここで、 β は係数、 t は時間である。

(2) 付着判定

本研究の位置づけは、コンクリート表面に付着する塩分量を評価することであるため、ランダムウォーク法に用いる粒子が構造物へいかに付着するかは重要なモデル化となる。小畑らは、鋼橋を対象とした飛来塩分の付着モデルを検討しているが、十分なデータを持ち合わせていないため、詳細な検証を避け、付着条件の影響を見るにとどまっている⁹⁾。したがって本研究においては、同様な理由から付着モデルの検討は行わず、構造物に衝突した粒子はすべて付着するとして完全付着モデルを採用した。

(3) 粒子の塩分濃度および沈降速度

ランダムウォーク法の大きな特徴の一つに個々の粒子ごとに個性を持たせることができることである。既往の研究³⁾において粒子の塩分濃度および沈降速度などを定義したが、今回の検証においては、対象橋梁の高さが海面より 5m 程度で、さらに、高さがそれほどないため、粒子の塩分濃度は一定かつ、沈降速度の影響は小さいものと考え、付着塩分量は付着粒子の個数に依存すると仮定している。

3. 実橋梁の実測

筆者らは、コンクリート橋の上部工（主桁）を対象に付着塩分量調査を実施している⁹⁾。ここでは、第 2 章で示した数値解析手法と比較するため、調査している部位のうち、飛来塩分の付着が卓越すると考えられる橋梁中央部のみの結果を示す。

3.1 対象橋梁および周囲の風況

対象橋梁は平成 23 年 3 月に供用開始された 3 径間ポストテンション PC 橋であり、沖縄本島北部東シナ海側に位置する。図-2 に位置図を示す。また、図-3 に対象橋梁側面図及び断面図を示す。

調査は図-3 に示した N（北側端部）、M（中央部）、S（南側端部）の位置の 5 主桁すべてで行った。本論文では両端部が強風と護岸の影響で直接波しぶきを受けることから、ランダムウォーク法との比較を行うため、飛来塩分の影響のみを受けると考えられる M（中央部）のみの調査結果を示す。

また、簡易的な気象データとして、対象橋梁周辺の風況（風向・風速）を代表すると考えられる伊是名気象台の

観測データを集計した。図-4 に 2008 年 1 月～2012 年 12 月の期間における累積風向割合を示す。同図より、年間を通して北寄りの風向頻度が高い風況であることがわかる。また、年間平均風速は 4.6m/s であった。

以上より、対象橋梁周辺は、冬季において季節風である北寄りの風が卓越するため、東シナ海から多量の塩分が供給される環境にあると考えられる。したがって、橋梁中央部は、橋梁とほぼ直交する海側から潮風を受ける条件となっていると考えられる。

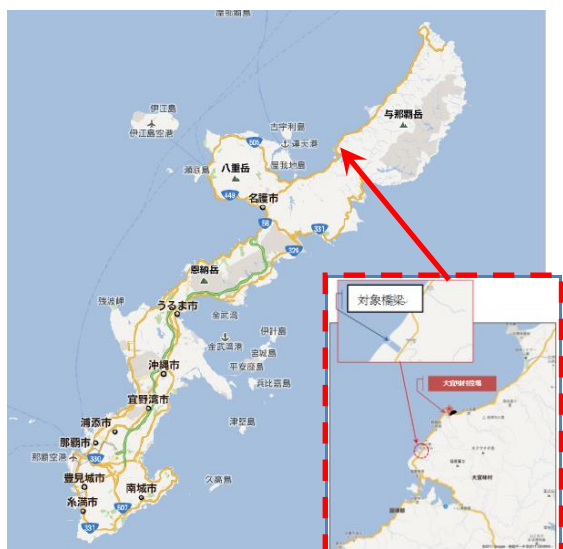


図-2 位置図(Google Map より)

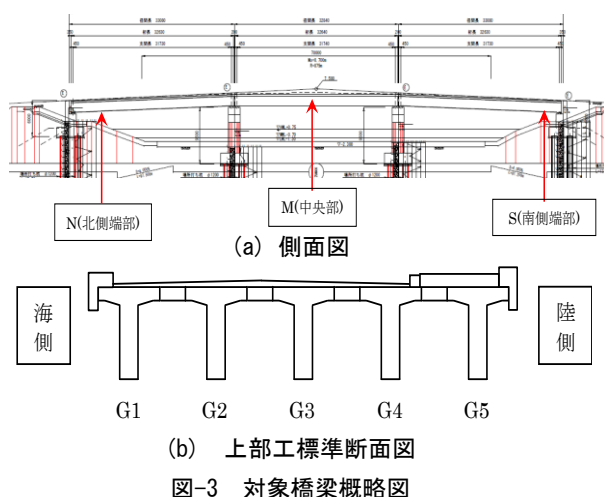


図-3 対象橋梁概略図

期間累計1月～12月(2008～2012)

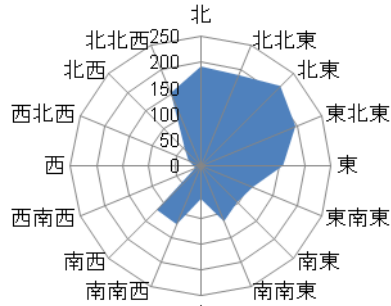


図-4 累積風向割合

3.2 ガーゼ拭き取り法

測定はガーゼ拭き取り法¹⁾によりコンクリート表面の付着塩分量を測定した。冬季の東シナ海側から吹く季節風を対象に測定日を 2012 年 2 月と 2013 年 3 月とした。したがって、調査時期の橋梁周辺の風況および飛来塩分はおおよそ橋梁直交方向の海側からのものである。

測定は写真-1 に示すように 20cm×20cm の範囲内のコンクリート表面をガーゼで拭き取り、拭き取ったガーゼを規定量の脱イオン水に浸けて塩素イオン検知管を用いて塩素イオンを検出した。また、測定は、5 主桁すべてに対して図-5 に示す #1～#5 の同じ位置で行った。



写真-1 拭き取りの様子

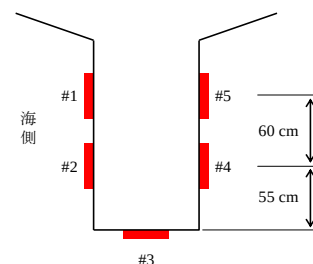


図-5 主桁の測定位置

3.3 調査結果

図-6 に図-7 の横軸に対応する測定箇所(面番号)を示す。図-7 に付着塩分量の測定結果を示す。測定の結果、飛来塩分は主桁下面に多く付着する傾向があり、特に海側から 2 番目の主桁下面が多く、陸側に行くにしたがい、付着量が減少していく特徴があるのが確認できる。また、海側の主桁下面が低いのも特徴的である。この結果は両日の測定結果とも同様な傾向を示している。このように同一構造物においても付着塩分量の分布が存在することがわかる。

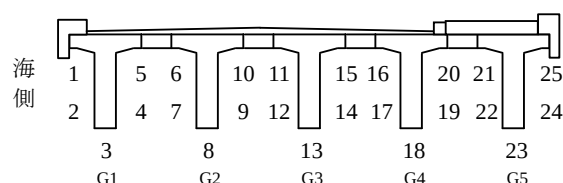


図-6 測定箇所

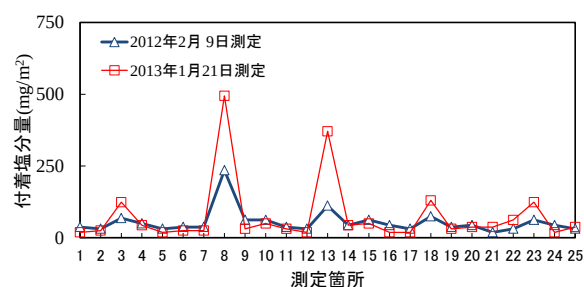


図-7 付着塩分量

4. 数値解析

4.1 解析モデルおよび解析条件

図-8 に解析領域を示す。解析領域は3次元とし、奥行きは3mとした。風は海側（左側）から図-8 に示すように風速 5m/s の一様風を与えた。なお、風速は伊是名気象台における平均風速を参考に決定している。

図-9 に要素分割図を示す。1,009,795 要素、174,434 節点であり、解析規模が大きいため、東洋大学計算力学研究センターのクラスターを16台用い、時間刻み 0.01 秒で30秒間計算を行った。

境界条件は、構造物表面をノンスリップ条件、側面および上面をスリップ条件とし、下面は、海面であるため、摩擦は少ないものと考え、スリップ条件とした。

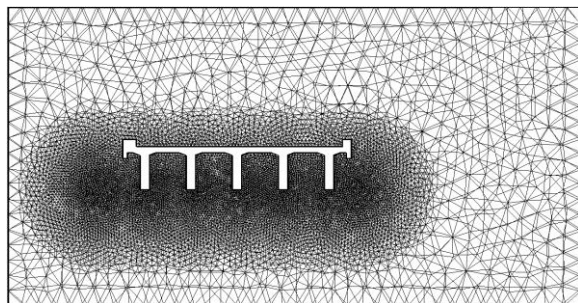
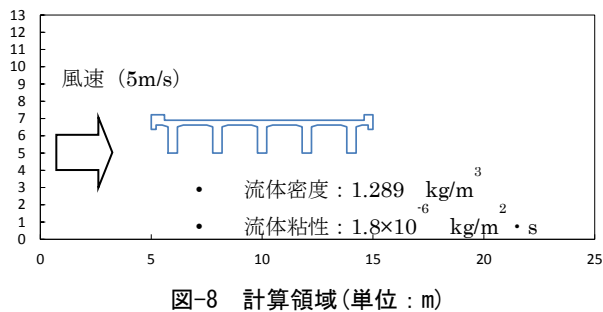


図-9 要素分割図

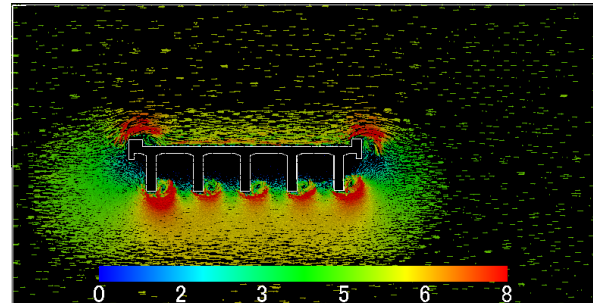
4.2 解析結果

ここでは、ランダムウォーク法に用いた風速場とその結果を用いたランダムウォーク法の計算結果について説明および考察する。また、調査結果との比較も行う。

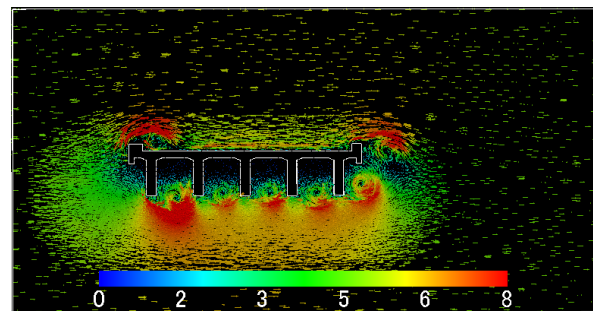
(1) 風速場

図-10 に風速場の計算結果を示す。ランダムウォーク法に用いた風速場（風速ベクトル図）は図-10 (b) に示す 0.5 秒後の結果を用いた。計算における風速は風上側（海側）から風速 5m/s の一様流を仮定しており、時間が進行するに従い、橋梁断面の風下側（陸側）にカルマン渦が発達するに伴い(図 (c))、桁間に卓越して生じた大きな渦(図-10 (a),(b))が、小さな渦に変化していく乱流場の流れに移行する。しかし、実際に風況として、一様な風速場が続くことはあり得ないと考えられることから、計算

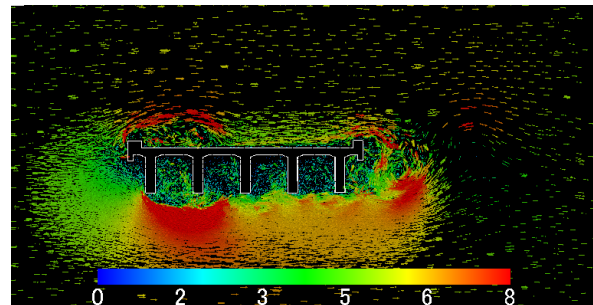
初期の状態、つまり、大きな渦が桁間に生じては消える周期的な流れ場となることが予想される。このためランダムウォーク法に用いる風速場として、桁間に最も大きな渦が生じた 0.5 秒後の風速場を用いることとした。



(a) 0.2 秒後



(b) 0.5 秒後



(c) 0.8 秒後

図-10 風速ベクトル(m/s)

(2) 構造物への付着解析

図-10 (b) の風速場を用いて、ランダムウォーク法による飛来塩分粒子の移流・拡散・構造物への付着解析を実施した。解析条件は、総粒子数を 20,000 個、時間刻みを 0.01 秒、計算ステップ数を 3000 とした。また、拡散パラメータである式(9)の β を予備解析の結果、0.1 とした。なお、解析は3次元解析であるが、2次元的な挙動であることから、粒子の発生および挙動を平面的に扱った。図-11 に予備解析の結果決定した粒子発生位置および図-12 に計算結果を示す。

図-12 より、飛来塩分粒子は発生位置から風速場に応じて移流および拡散し、構造物へ付着している現象が再現できていることが確認できる。また、図-13 に付着粒

子を構造物面ごとに評価した結果を示す。ここでは単位面積当たりの付着粒子数で整理した。その結果、図-7に示したガーゼ拭き取り法の結果と同様な結果を示していることがわかる。ただし、ランダムウォーク法の結果は、構造物表面に到達したすべての塩分量を表しているのに対し、ガーゼ拭き取りの結果は到達した塩分の反射、降雨による洗い流しおよび浸透などの減少効果を含めての結果であるため、現時点で定量的な比較評価は難しいと考えられるが、付着しやすい個所や付着量の割合の評価ということであれば両結果の比較は可能であると考えられる。

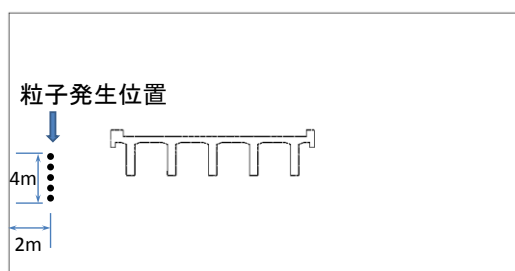
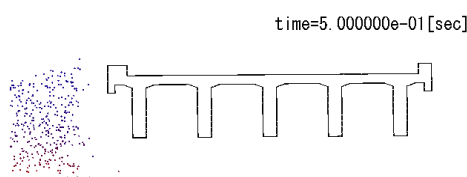
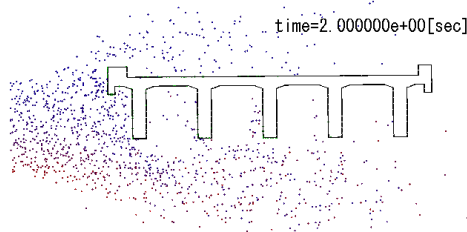


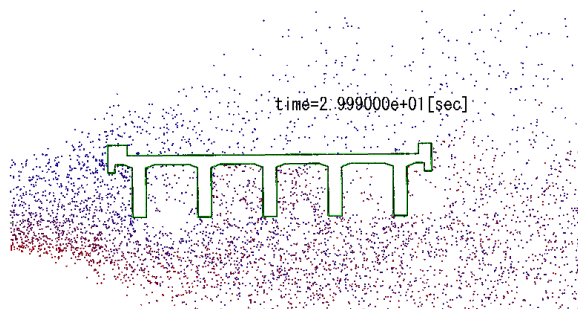
図-11 粒子発生位置



(a) 0.5 秒後



(b) 2.0 秒後



(c) 30 秒後（緑色の粒子は付着粒子を表す）

図-12 飛来塩分シミュレーション

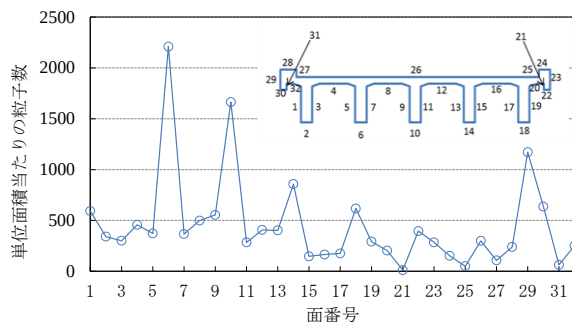


図-13 単位面積当たりの付着粒子数

(3) 両手法の相関関係

ここでは、ランダムウォーク法とガーゼ拭き取りの結果の相関を確認する。単位の異なる両者の相関をとるために、付着量の最も多い、海側から2番目の主桁下面の結果を用いて正規化した。また、ガーゼ拭き取り法は、桁側面の測定を2箇所で行っているため、側面の値として2測定結果の平均値とした。また、ガーゼ拭き取り法は床版下面の結果がないため、比較対象外とした。

図-14 にランダムウォーク法とガーゼ拭き取り法の正規化した付着塩分量の比較を示す。なお、面番号は図-13に示した面番号に対応する。この結果より、全体的に良い一致を示しており、特に主桁下面の一致は良好である。

ガーゼ拭き取り法の海側桁側面の値はランダムウォーク法に比較し、低い値となっており、これは降雨による洗い流し効果もあると考えられる。しかし、主桁下面に比較するとランダムウォーク法の海側の主桁側面の付着量は小さな値となっている。これは、その位置で風速による圧力が負圧となっていることから、風況上飛来塩分が付着し辛い可能性も考えられ、必ずしも降雨による洗い流し効果だけではないことも示唆される。

図-15 に、全体の相関図（図-15(a)）と主桁下面のみの相関図（図-15(b)）を示す。この図より、両結果の値に良い相関があることがわかる。特に主桁下面においての相関は良好である。多少相関の悪い主桁側面において、ランダムウォーク法の値は、ガーゼ拭き取り法に対して大きな値を示していることから安全側の評価となる。

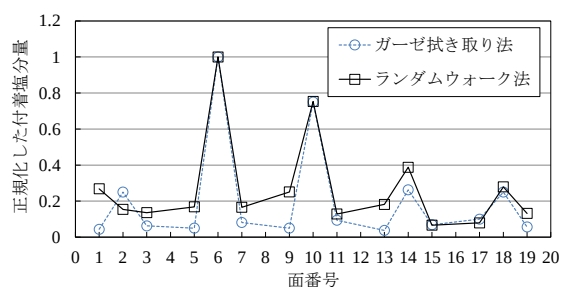
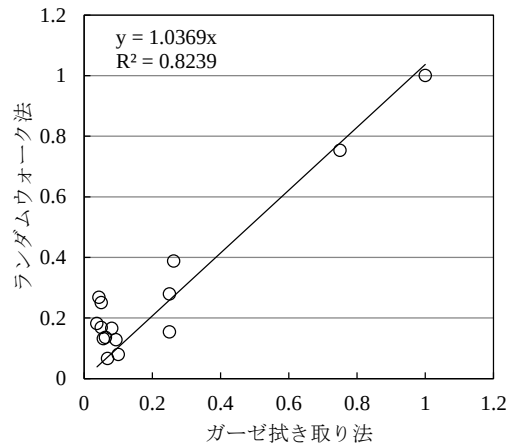
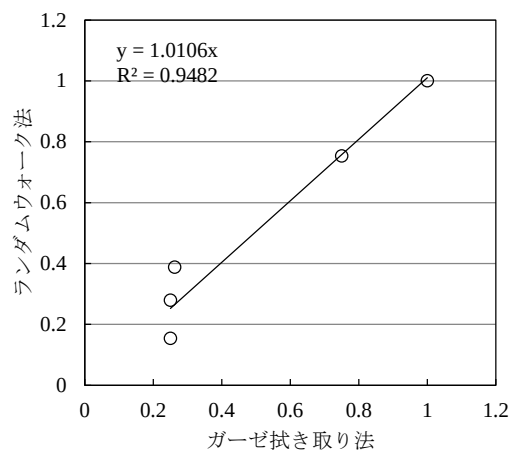


図-14 ランダムウォーク法とガーゼ拭き取り法の比較



(a) 全面的付着塩分量の相関関係



(b) 桁下面のみ付着塩分量の相関

図-15 ランダムウォーク法とガーゼ拭き取り法の相関

5. まとめ

本研究では、コンクリート橋上部工を対象に、ランダムウォーク法による数値解析的検討を行った。解析の妥当性を評価するために、実橋梁のガーゼ拭き取り法により付着塩分量調査を実施し、両結果を比較検討し、本手法の妥当性が示された。

以下に今回得られた知見および今後の課題を示す。

- 1) 実橋梁のガーゼ拭き取り法の結果、飛来塩分は桁下面に多く付着する傾向があり、特に海側から2番目の桁下面が多く、陸側に行くにしたがい、付着量が減少していく特徴があり、同一構造物においても付着塩分量の空間分布が存在することが確認できた。
- 2) ランダムウォーク法による結果もガーゼ拭き取り法同様の付着量分布を示した。
- 3) 両結果を最も多く付着した海側から2番目の主桁下面の値で正規化した値に対して、相関をとったところ、良い相関があることが確認できた。特に、主桁下面の相関は良好であった。

今後の課題として、本解析手法に、降雨による洗い流し効果、反射、浸透塩分などのモデルを検討し、表面塩化物イオン濃度との関係性を明らかにすることが挙げられる。

謝辞：本研究を遂行に当たり、測定場所をご提供頂いた沖縄県大宜味村、ガーゼ拭き取り法に対して橋梁点検車など測定に協力頂いた(独)土木研究所構造物メンテナンス研究センター(CAESAR)橋梁構造研究グループに感謝いたします。また、数値解析的検討に対して、貴重なご助言を頂いた東洋大学中林靖准教授および(公社)日本コンクリート工学会コンクリート構造物の長期性能シミュレーションソフト作成委員会 WG1 の委員の皆様へ感謝いたします。また、計算は東洋大学計算力学研究センターの計算機を利用した。ここに記して謝意を表す。

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) 小川彰一, 江口信三: Lagrange 粒子モデルを用いた PC 橋への海塩粒子付着シミュレーション, 土木学会第 57 回年次学術講演会, V-533, pp.1065-1066, 2002.
- 3) 田中孝和, 富山 潤, 伊良波繁雄, 吉村 忍: ランダムウォーク法による飛来塩分の拡散シミュレーションに関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.789-794, 2004
- 4) 山田文則, 細山田得三, 下村匠, 佐藤堅介: 構造物周辺における飛来塩分の輸送過程に関する数値解析と現地観測, コンクリート工学年次論文集, Vol.28 No.1 pp.1001-1006, 2006.
- 5) 岩崎栄治, 長井正嗣: 橋梁断面周辺の飛来塩分の推定に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.53A, pp.739-746, 2007.
- 6) 小畑誠, 長谷川高士, 永田和寿, 後藤芳顕: 固気 2 相流体解析における飛来塩分の付着シミュレーション, 構造工学論文集, Vo.54A, pp.590-598, 2008.
- 7) 富山潤, 松浦葵, 中林靖: ランダムウォーク法を用いたコンクリート橋の付着塩分量評価, 土木学会第 68 回学術講演会, V-496, pp.991-992, 2013.
- 8) 松浦葵, ほか 4 名: ガーゼ拭き取り法におけるコンクリート橋梁の付着塩分量に関する調査研究, 土木学会第 68 回学術講演会, V-495, pp.989-990, 2013.
- 9) ADVNETURE: <http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/ip/>
- 10) 矢川元基, 中林靖, 奥田洋司: 有限要素法流れの解析 (計算科学シリーズ), 朝倉書店, 1998.
- 11) 日本道路協会: 鋼道路橋塗装・防食便覧(付属資料), 付 II, pp.119-120, 2006.