

論文 コンクリート橋梁上部工に付着する塩分量分布に関する数値実験

富山 潤*1・羽瀧 貴士*2・宮里 心一*3・中林 靖*4

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現場調査では知られている。但しこの理由を、海から輸送される飛来塩分の構造物への付着量に着目し検証した事例は少ない。そこで本研究では、風速、断面形状、寸法をパラメータとしたコンクリート橋梁上部工モデルを対象に、飛来塩分の付着分布に関する数値実験を行い、それぞれの検討ケースに応じた付着塩分量の空間分布を解析的に表現し、その特徴について議論した。

キーワード：飛来塩分、コンクリート構造物、付着塩分量分布、ランダムウォーク法、数値実験

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現場調査では知られている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は、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。また、それらを考慮することで、合理的で効果的な維持管理の可能性を示している。

以上の背景により、文献2)では、実際のコンクリート橋上部工を対象に、ガーゼ拭き取り法による付着塩分量の実測値と本研究で採用している数値解析手法との計算値の比較を行っている。その結果、実測値と計算値の相関が非常に高いことが確認されており、本手法は実測値の傾向を再現できる手法であるといえる。しかし、構造物に付着する塩分量の分布は、構造物の形状・寸法および構造物周辺の卓越する風速場に大きく依存することから、本研究では、風速および断面形状、寸法をパラメータとしたコンクリート橋梁上部工モデルを設定し、各種条件の違いによって、飛来塩分の付着量の分布がどのように変化するかを把握するために提案手法を用いてパラメトリックスタディを行い、それぞれの検討ケースに応じた付着塩分量の分布の特徴について議論した。なお、

その他の影響因子と「雨がかり」や「構造物表面性状」などの影響については今後の課題とする。

2. 粒子拡散モデル

2.1 解析概要

本解析手法は、図-1に示すように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風速場を解く第1ステップと、第1ステップで得られた風速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³⁾(以下、RW法と称す)により飛来塩分粒子の移流・拡散および構造物への付着を解く第2ステップからなる。

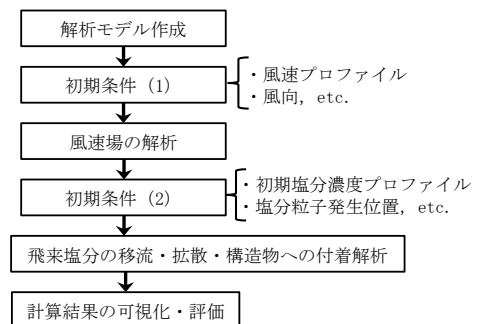


図-1 解析フローチャート

2.2 風速場の解析

構造物周辺の流れ場は、ADVNETURE_Fluid_Tet⁴⁾を用いて解いた。ADVNETURE_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)

*2 東亜建設工業(株) 技術研究開発センター副センター長 博士(工学) (正会員)

*3 金沢工業大学 環境・建築学部 環境土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

*4 東洋大学 総合情報学部 総合情報学科 准教授 博士(工学)

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

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⁵⁾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/PSPG⁶⁾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 RW 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 $u_i(u, v, w)$ 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。

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

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。

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

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、RW 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⁾。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、安全側を考慮し、構造物に衝突した粒子はすべて付着するとした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

RW 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、構造物周辺のみを対象にしたため、沈降速度の影響の小さい領域を想定し、さらに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。

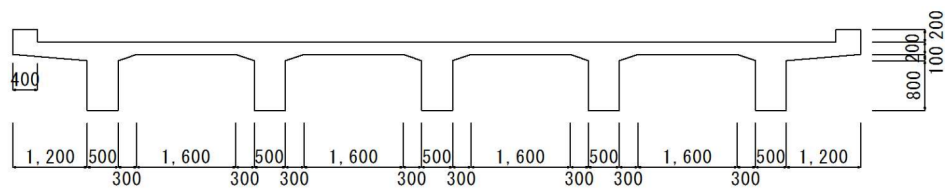
3. 数値実験概要

3.1 実験ケース

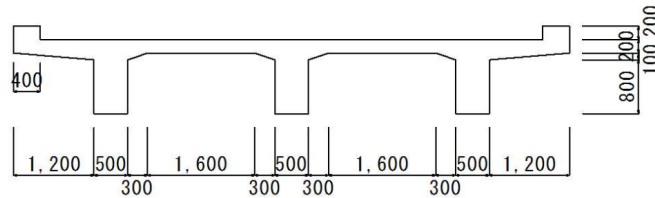
対象構造物は、図-2 に示す断面形状を示す。下フランジがある断面についても検討を行っている。解析ケースは、風速の影響、主桁数の影響、主桁間長の影響、下フランジの影響に対して設定した。また、検討ケースを表-1 に示す。また、#4 の検討ケースでは、主桁に付着する粒子の鉛直分布についても評価した。

表-1 解析ケース

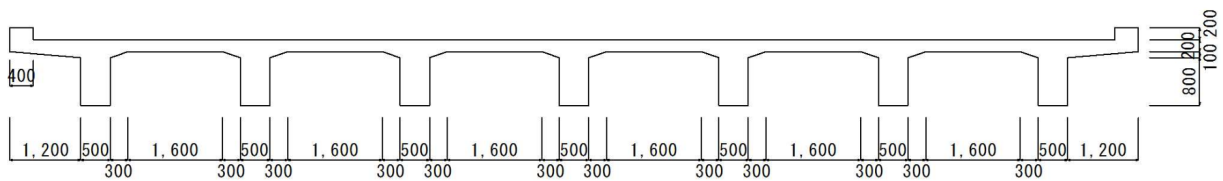
検討ケース	検討課題	主桁数	主桁間長(mm)	風速(m/s)	下フランジ
#1 (標準断面)	風速の影響	5	1,600	1, 3, 5, 7	なし
#2	主桁数の影響	5,3,7	1,600	3	なし
#3	主桁間長の影響	5	600・1,600・2,600	3	なし
#4	下フランジの影響	5	1600	3	あり、なし



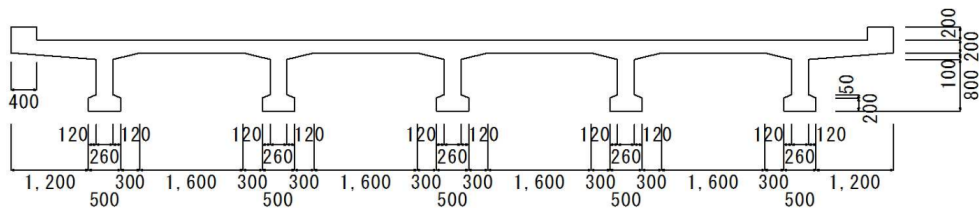
(a) 5 連桁（標準断面，#3 では，主桁間長を標準断面のほかに 600mm・2,600mm を設定）



(b) 3 連桁



(c) 7 連桁



(d) 5 連桁（下フランジあり）

図-2 解析対象構造物断面

3.2 解析モデルおよび解析条件

図-3 に標準断面の 5 連桁の解析領域を示す。解析領域は 3 次元とし、奥行きは 2m とした。入力風速として、図左側より一様な風速を与えた。なお、解析領域の高さと、風上側の主桁下面の位置は全ての領域で統一した。

図-4 に要素分割図を示す。27,0421 要素，50,124 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16 台用い，時間刻み 0.01 秒で計算を行った。また，RW 法も同様に 0.01 秒で計算した。

他のモデルについても各々のモデルサイズに合わせて要素サイズが同じになるように要素分割を行っている。境界条件は，構造物表面をノンスリップ条件，解析領域の側面および上面をスリップ条件，下面は，摩擦は少ない理想的な条件を考慮し，スリップ条件とした。また，流体の物性値として，流体密度：1.289 kg/m³，流体粘性：1.8×10⁻⁶kg/m²・s を仮定した。

図-5 に粒子発生位置を示す。粒子は，左側から 2m，高さ 3m の位置から 4m の幅を持たせてランダムに発生させた。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。

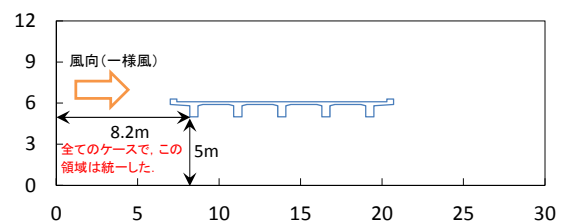


図-3 計算領域(単位：m)

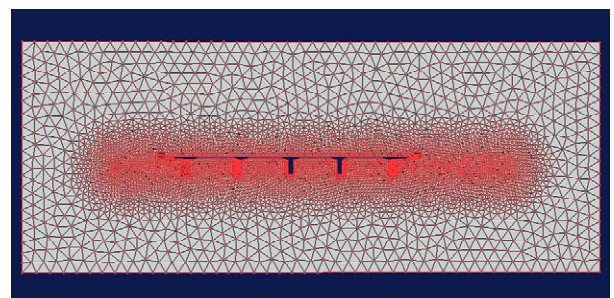


図-4 要素分割図

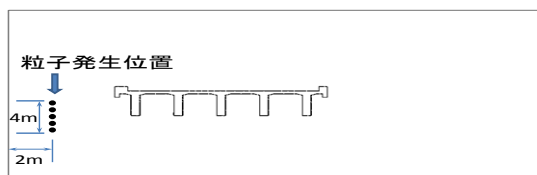


図-5 粒子発生位置

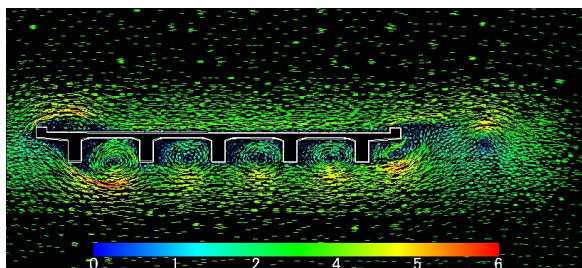
4. 数値実験結果および考察

4.1 風速の影響

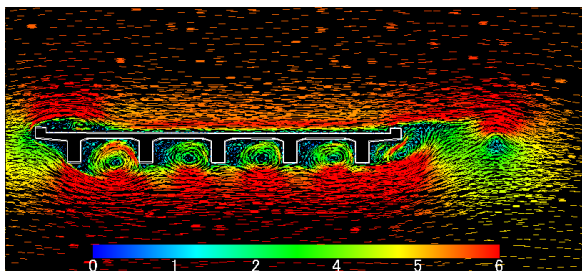
図-6 に RW 法に用いた入力風速 3m/s と 5m/s の風速ベクトルを示す。なお、RW 法に用いる風速場の決定は、主桁間に大きな渦が生じたときの風速場とした。なお、他の入力風 1.5m/s および 7m/s についても相対的には同様な風速場となっている。RW 法では、総粒子数を 20,000 個、解析領域長が 30m となっていることから、全体の解析時間 t は、風速 $\times t = 30\text{m}$ となるように設定した。

図-7 に飛来塩分シミュレーションの一例としてケース 1 の入力風速 3m/s の結果を示す。この図から、粒子が発生、移流・拡散し、構造物へ付着していく様子が確認できる（緑色の粒子は付着粒子を意味する）。

図-8 に単位面積当たりの付着粒子数を示す。面番号 1 ～23(上部工の上面以外)に着目すると、風速に応じて付着量は変化するが、相対的な付着分布はほぼ同様であり、海側の主桁側面および海側から 2 番目の主桁下面に多く付着する傾向がある。主桁側面については、陸側より海側に塩分が多く付着し、床版下面にも側面と同程度の塩分が付着していることがわかる。また、海側から 2 番目の主桁下面においては、風速が大きくなるほど付着粒子数が増える傾向を示している。



(a) 入力風速 3m/s(解析開始から 1.5s 後の風速場)



(b) 入力風速 5m/s(解析開始から 1.0s 後の風速場)

図-6 RW 法に用いた風速場 (ケース 1, 単位:m/s)

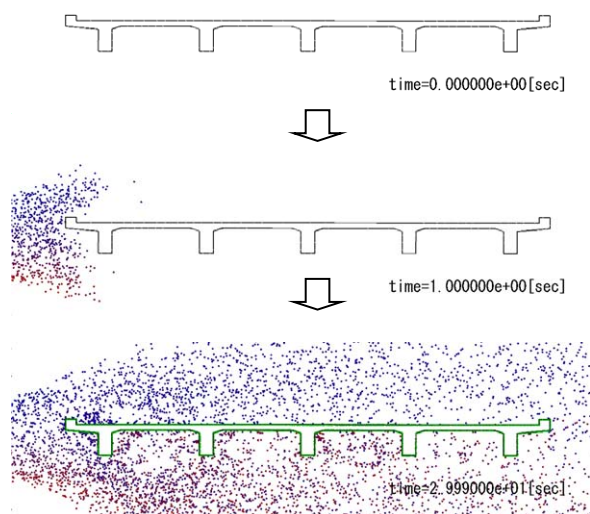
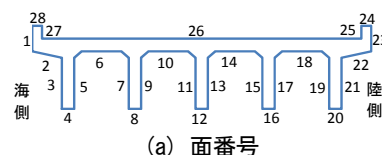
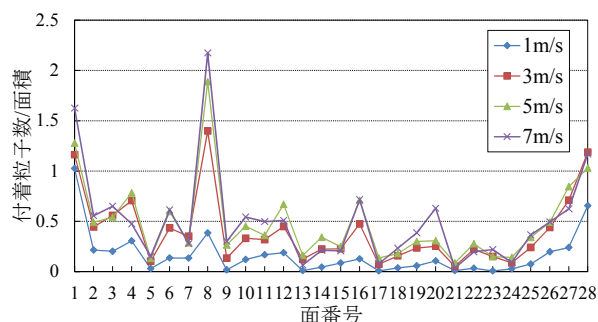


図-7 粒子の移流・拡散・付着状況 (ケース 1)



(a) 面番号



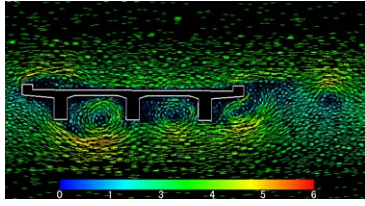
(b) 付着粒子数

図-8 単位面積当たりの付着塩分粒子数 (ケース 1)

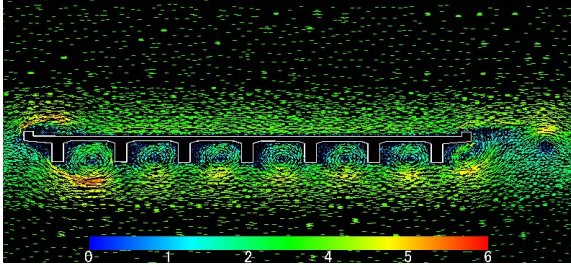
4.2 主桁数の影響

飛来塩分シミュレーションは、4.1 と同様に図-9 に示す主桁間に大きな渦が生じたときの風速場を用いた。なお、5 連桁の風速場は、図-6(a)を用いている。解析領域長は、5, 3, 7 連桁でそれぞれ 30, 25, 35m になることから、対象構造部の寸法が異なるため、全体の解析時間 t を風速 $\times t = 30, 25, 35\text{m}$ となるように設定した。

図-10(a)に面番号、図-10(b)に単位面積当たりの付着塩分粒子数による評価を示す。なお、図-9(b)は 3 連桁に合わせて面番号を表示している。この結果、主桁数の違いに関わらず海側から 2 番目の主桁下面の付着粒子数が大きくなる傾向にある。また、主桁側面の単位面積当たりの付着粒子数は、主桁側面および床版下面については、4.1 と同様の傾向を示している。

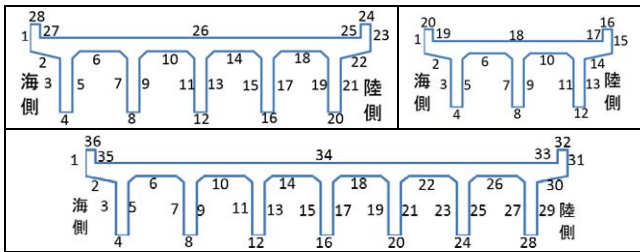


(a) 3連桁(解析開始から1.5s後の風速場)

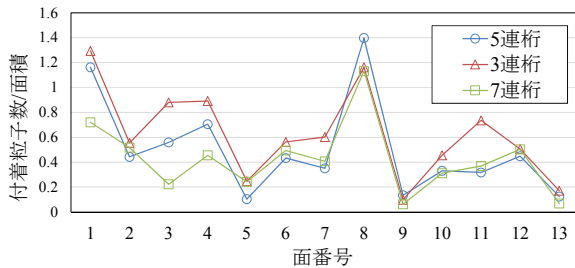


(b) 7連桁(解析開始から1.5s後の風速場)

図-9 RW法に用いた風速場(ケース2, 単位: m/s)



(a) 面番号



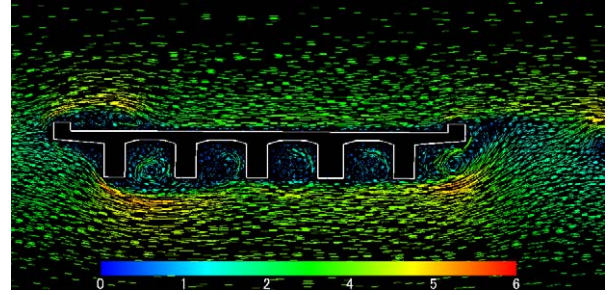
(b) 付着粒子数

図-10 単位面積当たりの付着塩分粒子数(ケース2)

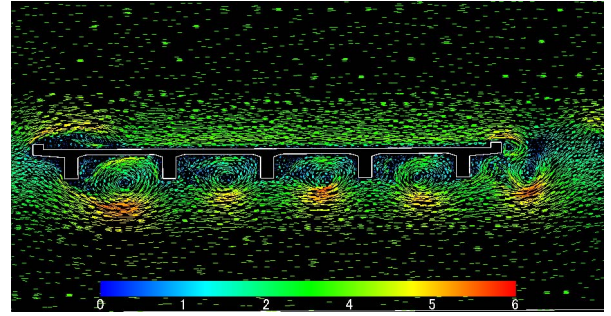
4.3 主桁間長の影響

飛来塩分シミュレーションは、4.1と同様に図-11に示す主桁間に大きな渦が生じたときの風速場を用いた。なお、解析領域長は、主桁間長が1,600, 600, 2,600mmでそれぞれ30, 25, 35mになることから、全体の解析時間 t は、風速 $\times t=30, 25, 35m$ となるように設定した。図-12に単位面積当たりの付着塩分粒子数を示す。図-12の面番号は、図-8(a)と同様である。また、主桁間長1,600mmの風速場は、図-6(a)を用いている。

図-12より、主桁間長1,600mm, 600mmでは、全体的に、これまでと同様な結果であるが、主桁間長2,600mmは、これまでの傾向と異なる結果が得られた。したがって、形状が同じであっても主桁間長の違いにより塩分が付着しやすい箇所が異なることが予想される。



(a) 600mm(解析開始から3.5s後の風速場)



(b) 2,600mm(解析開始から1.0s後の風速場)

図-11 RW法に用いた風速場(ケース3, 単位: m/s)

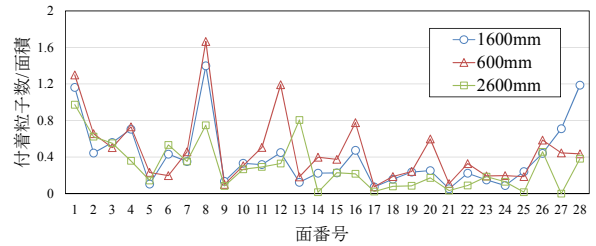


図-12 単位面積当たりの付着塩分粒子数(ケース3)

4.4 下フランジの影響

(1) 付着塩分量

図-13に飛来塩分シミュレーションに用いた下フランジありの風速場(解析開始から1.0s後の風速場)を示す。下フランジなしの結果は、図-6(a)を用いている。

図-14に単位面積当たりの付着粒子数を示す。また、比較のために、下フランジなしの結果は面番号を下フランジに合わせ、×プロットで示した。

これまでの検討ケースでは、主桁下面に多く付着する傾向があったのに対して、下フランジありでは、海側のフランジ側面に多く付着する傾向を示しているのがわかる。それ以外は、下フランジなしの結果とほぼ一致している。

なお、これまで示した単位面積当たりの付着塩分粒子数は、面全体に付着した粒子を平均化していることになる。このことより、面ごとに付着塩分の分布があることが考えられる。そこで、ここでの検討断面において、主桁側面の付着塩分粒子数の鉛直分布を確認することとする。

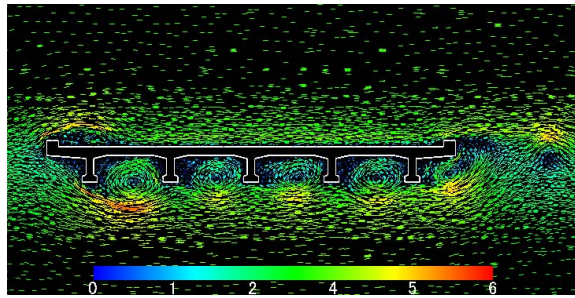


図-13 RW法に用いた風速場(ケース4, 単位: m/s)

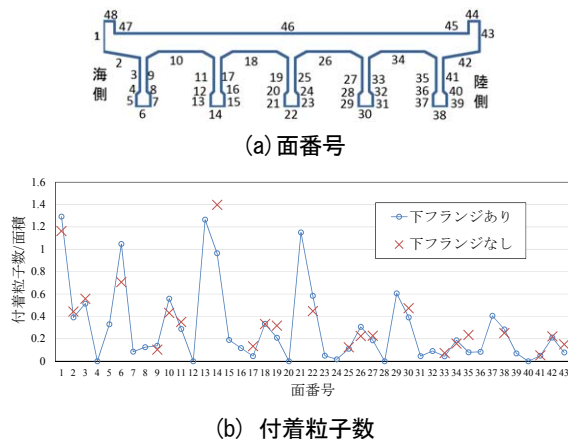


図-14 単位面積当たりの付着塩分粒子数(ケース4)

(2) 付着塩分量の鉛直分布

図-15に示す主桁G1～G5の海側の側面(朱線)を対象に、桁高0.8mに対して0.1m間隔に付着した粒子の数の分布を示す。その結果、下フランジなしでは、G1桁のみにおいて高さ方向に付着粒子数の分布差が確認できる。それ以外の主桁では、明確な分布差は確認できない。また、下フランジありでは、G2以外の主桁で鉛直分布が確認できる。

ここでの比較は、下フランジの有無以外は同じモデルであることから、ここで得られた結果は、明らかに下フランジの有無による差であり、下フランジがあることで、全体的に付着塩分量が多くなることが確認できる。

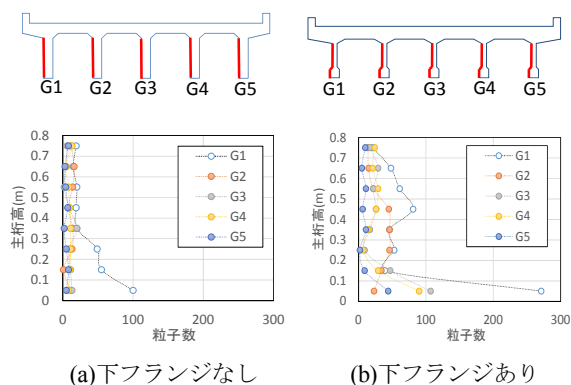


図-15 付着塩分の鉛直分布

5. まとめ

橋梁上部工に付着する塩分量分布について、4つの検討ケースを設定した数値実験によるパラメトリックスタディを行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 風速の影響については、全ケースにおいて主桁下面に多く付着する傾向を示し、特に海側から2番目の主桁下面に多く付着した。また、主桁下面では風速が速くなるほど付着粒子数も多くなる傾向を示した。
- (2) 主桁数の影響については、主桁数の少ない3連桁を基準に検討した結果、風速場の影響により、多少付着性状は異なるが、海側から2番目の主桁下面に多く付着する傾向を示した。
- (3) 主桁間長の影響については、主桁間長の違いにより桁の形状は同じであっても塩分が付着しやすい箇所は異なる結果を得た。
- (4) 下フランジの影響については、「あり」では、海側のフランジ側面に多く付着する傾向を示し、主桁側面の付着塩分粒子の鉛直分布も確認できた。また、「あり」は「なし」に比較し、全体的に付着塩分量が多くなることが確認できた。

今後は、解析精度を上げるために「雨による洗い流し効果」や「構造物表面の影響」などの検討や実構造物を対象とした測定結果との比較を行っていく予定である。

謝辞：研究遂行に当たり、JCI 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の皆様に有益な助言を頂いた。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示す。

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) 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
- (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) ADVNETURE: <http://adventure.sys.t.u-tokyo.ac.jp/jp/>
- (5) 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.
- (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.