

論文 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

田中 孝和*1・富山 潤*2・伊良波 繁雄*3・吉村 忍*4

要旨: 本研究は、海岸からの飛来塩分の拡散現象を解析的に求めることを目的とするものである。沿岸域におけるコンクリート構造物の塩害は深刻な問題である。このため、その要因の一つである飛来塩分の拡散現象を数値的に求めることは重要な課題である。本研究は、3次元空間における飛来塩分の拡散現象の求解法としてランダムウォーク法を用い、地面の起伏などを考慮した解析、また橋梁の主桁周辺における塩分粒子の挙動の解析を示した。

キーワード: ランダムウォーク法, 飛来塩分, 塩害, 数値解析

1. はじめに

沖縄県のようなまわりを海に囲まれた小さな島々では、海から飛来する海塩粒子による塩害がコンクリート構造物に対して深刻な損傷を与えている^{1) 2)}。塩害は、外観と内部損傷との間に極めて大きな落差がある。外観では一見健全そうであっても、内部劣化が表面に現れていないことに過ぎないことであり、内部損傷を早期発見することは極めて重要なことである。また、同じような環境に置かれた構造物(橋梁)でも、橋の形式の違いなどで損傷の程度が異なる。このため、飛来塩分の移流拡散現象を解析的に求め、橋梁内部ではどのような状況になっているか把握することは重要な課題である。

本手法では、粒子拡散法の一つである3次元ランダムウォーク法³⁾を採用した。この方法を採用した理由は、モデル化が容易で、複雑な風速場における拡散現象が予測可能であることや各粒子の拡散を個別に扱え、また、濃度分布を解明するために大気中の多数の粒子を数値的に追跡できることである。

本研究では、現実に近い複雑な地面の起伏を考慮した解析及び、T桁橋(主桁)の形状の違いによる、塩分粒子の移流・拡散、付着挙動の解析を行った。

2. 理論と計算概要

2.1 風速場

本研究では、風速場を3次元層流と仮定し、以下に示す有限要素法により求めた。

(1) 基礎方程式

非圧縮粘性流体の運動は、以下の質量保存則から導かれる連続の式と、運動量保存則から導かれる Navier-Stokes 方程式によって支配される。

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

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

ここで、 u は流速、 ρ は密度、 f は物体力を表している。また応力 σ 、歪み ε は以下の式で表される。

$$\sigma = -pI + 2\nu\varepsilon \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\nabla u + (\nabla u)^T) \quad (4)$$

ここで、 p は圧力、 I は単位行列、 ν は粘性係数である。境界条件としては、以下の速度境界条件と表面力境界条件を与える。

$$u = g \quad \text{on } \Gamma_1 \quad (5)$$

$$t \equiv \sigma \cdot n = h \quad \text{on } \Gamma_2 \quad (6)$$

ここで、 g, h はそれぞれ流速を表し、 Γ_1, Γ_2 はそれぞれ速度境界条件と表面境界条件の与えられる境界を表し、また n は境界に対する法線ベク

*1 琉球大学大学院 理工学研究科 修士(工学) (正会員)

*2 琉球大学助手 工学部環境建設工学科 博士(工学) (正会員)

*3 琉球大学教授 工学部環境建設工学科 博士(工学) (正会員)

*4 東京大学大学院教授 新領域創成科学研究科 博士(工学) (非会員)

トルを表している。

(2) 有限要素法による定式化

本研究では、風速場を求めるツールとして、Adventure_Fluid_Tet⁴⁾を用いた。以下にその概略を述べる。上述で示した支配方程式(1)(2)に対して、P1-P1要素を用いた安定化有限要素法(SUPG/PSPG法)を適用し、流速、圧力それぞれの重みを w, q とすると以下の弱形式を得る。

$$\begin{aligned} & \int_{\Omega} w \cdot \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u - f \right) d\Omega + \int_{\Omega} w \cdot \sigma d\Omega + \int_{\Omega} q \cdot u d\Omega \\ & + \sum_e \int_{\Omega^e} \tau_{SUPG} \cdot u \cdot \nabla w \cdot \left[\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u - f \right) - \nabla \cdot \sigma \right] d\Omega \\ & + \sum_e \int_{\Omega^e} \tau_{PSPG} \cdot \frac{1}{\rho} \cdot \nabla q \cdot \left[\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u - f \right) - \nabla \cdot \sigma \right] d\Omega \\ & = \int_{\Gamma_h} whd\Gamma \end{aligned} \quad (7)$$

ここで、 N_e は要素数を表している。左辺第1~3項は、式(1)(2)に対する通常のカラキ項、第4項は上流化項(SUPG)、第5項は圧力安定化項(PSPG)である。なお、 τ_{SUPG} 、 τ_{PSPG} は安定化パラメータであり、次式に示す。

$$\tau_{SUPG} = \left[\left(\frac{2}{\Delta t} \right)^2 + \left(\frac{2\|u\|}{h_e} \right)^2 + \left(\frac{4\gamma}{h_e^2} \right)^2 \right]^{-1/2} \quad (8)$$

$$\tau_{SUPG} = \tau_{PSPG} \quad (9)$$

$$h_e = 2 \left(\sum_{\alpha=1}^{N_e} \frac{u \cdot \partial N_{\alpha}}{\|u\| \partial x} \right)^{-1} \quad (10)$$

ここで、 h_e は要素サイズ、 N_{α} は形状関数である。

次に未知変数の離散化を行い、さらに行列方程式の形に整理し直すと以下のように表される。

$$\begin{aligned} (M + M_{\delta}) \frac{\partial u}{\partial t} + (N + N_{\delta}) u \\ + (K + K_{\delta}) u - (G + G_{\delta}) p = F + F_{\delta} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} (G^T + G_{\varepsilon}^T) u + M_{\varepsilon} \frac{\partial u}{\partial t} + N_{\varepsilon} u - \\ K_{\varepsilon} u + G_{\varepsilon} p = F_{\varepsilon} \end{aligned} \quad (12)$$

ここで、 u は流速、 p は圧力、 M, N, K, G, G^T はそれぞれ、質量、対流、拡散、勾配、発散を表し、 F は外力ベクトルであり、添字 δ, ε はそれぞれSUPG法、PSPG法に起因する事を示している。

式(11)(12)を時間に関しては、時間積分法(Crank-Nicolson法)で離散化し、圧力及び連続の式の流速に関して陰解法で直接解いている。

2.2 海塩粒子の拡散

(1) 移流拡散モデル

本研究では飛来塩分の移流拡散モデルとして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。

ランダムウォーク法については文献(3)に詳しいので、ここでは簡単に述べる。

3次元乱流で*i*ステップ目の粒子の風下距離 x_i 、奥行き方向 y_i 、鉛直方向 z_i とし、それぞれの速度を u_i, v_i, w_i とする。本研究では乱流を考慮するために、ランダムウォーク法を用いるので、粒子の速度を求める際に、乱流統計量を扱っている。以下にそれぞれの粒子の位置と速度の関係を示す。

$$x_{i+1} = x_i + u_{i+1} \Delta t \quad (13)$$

$$y_{i+1} = y_i + v_{i+1} \Delta t \quad (14)$$

$$z_{i+1} = z_i + w_{i+1} \Delta t \quad (15)$$

ここで、 Δt は時間ステップである。 u_i, v_i, w_i はそれぞれの x, y, z 方向における粒子の速度を示し、次式で表される。

$$u_{i+1} = \alpha u_i + \lambda_{i+1} \quad (16)$$

$$v_{i+1} = \alpha v_i + \varepsilon_{i+1} \quad (17)$$

$$w_{i+1} = \alpha w_i + \mu_{i+1} \quad (18)$$

ここで、 $\lambda_{i+1}, \varepsilon_{i+1}, \mu_{i+1}$ は乱流統計量、流れ場の特性により求まるランダムな変数である。また、 α はラグランジュの相関関数であり、中立層内では普通、次のように表される。

$$\alpha = R(t) = \exp(-\Delta t / \tau_L) \quad (19)$$

ここで、 τ_L はラグランジュの時間スケールである。式(16)(17)(18)は、前ステップの粒子の移動(移流速度)を引きずる部分(右辺の第一項目)、ある標準偏差をもって毎回乱数で大きさが任意に変わる部分(右辺の第二項目)で表される。

また、飛来塩分は、海岸線から内陸方向に飛来する際に、粒子自身の自重や湿度などに大きく影響を受けると考えられる。故に本研究では、沈降速度を考慮し、海岸線から内陸方向に減少し、さらに高さ方向にも関係があるものとし、簡易的ではあるが z 方向の粒子の沈降速度として、次式⁵⁾を仮定した。

$$W(x,z) = W_0 \exp(-B(x+z)) \quad (20)$$

ここで、 $W(x,z)$ は、内陸の任意位置における沈降速度、 W_0 は砕波位置での粒子の降下速度、 B は定数である。

(2) 飛来塩分の濃度測定

飛来塩分の濃度に関しては、図-1に示すような計算空間をグリッド上に分割して、ある時間のあるグリッド内にある個々の粒子がもつ濃度情報⁵⁾より求める。

粒子を発生させる際の初期塩分量として、それぞれの高さで異なる仲座らの提案した式(21)で示す無次元濃度 $C_0(z)$ ⁶⁾とした。これは、塩分粒子の発生位置が高いほど無次元塩分濃度が小さいことを示している。

$$C_0(z) = \exp(Az) \quad (21)$$

ここで、 A は飛塩量の鉛直方向の減少率を与える係数である。

また、式(21)をもとに式(22)より各グリッド内にある時間あたりの塩分濃度 C_{flax} を次式で表す。

$$C_{flax} = k \sum_{i=1}^N C_0(z) / (V \cdot t) \quad (22)$$

ここで、 $C_0(z)$ は、粒子発生位置 z_0 で与えた初期無次元濃度、 V はグリッドの体積、 N はグリッド内に現在存在する粒子数、 k は換算係数、 t は時間を示す。

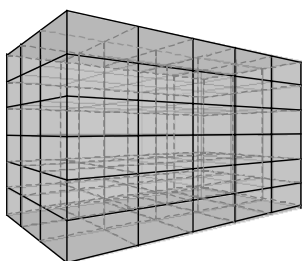


図-1 濃度測定のためのグリッド配置

3. シミュレーションモデル作成方法

本研究では、シミュレーションする際に用いる地形、橋梁モデルを、ADVENTURE_CAD⁴⁾により作成した。ADVENTURE_CADによるモデル作成は、テキスト入力であるため、本研究では解析モデルを容易に作成できるように VisualBasic を用いてインターフェイスを開発した。

次にコンクリート構造物（橋梁）及び地形モデルの作成方法を簡単に示す。

3.1 地形モデル

地形モデル作成には、コンター図のみの地図を用意する。その画像の等高線に対して、図-2のように高さごとに異なる色を塗る。またその画像に対して、等間隔のグリッドを配置し、等高線上にない各々の点の等高データは色を塗った等高線データから補間した。

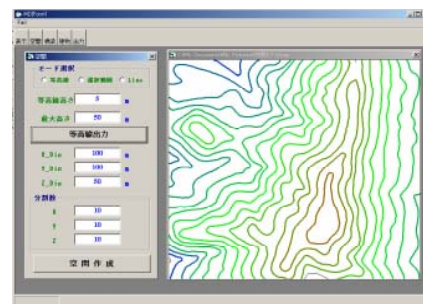


図-2 地形モデル作成図

補間方法としては、図-3に示すように補間を行う節点を中心点として直線を伸ばし、それぞれ最初に等高線と交差する2つの点を拾ってくる。それを360度全ての角度に対して行い、2点間の最短距離を探す。その2点を使い線形補間して、求めたい高さを決定する。

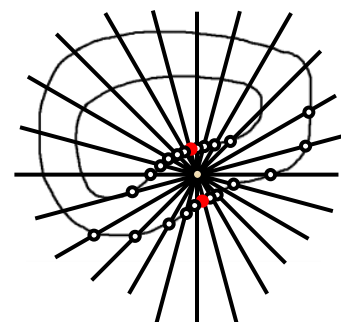


図-3 等高線からの高さ補間

3.2 橋梁モデル

図-4 に示すように橋梁モデルは、CAD データ(断面図)の画像から構造物の各頂点を拾い、座標データとする。その座標データを奥行き方向に伸ばすことで、橋梁モデルとしている。

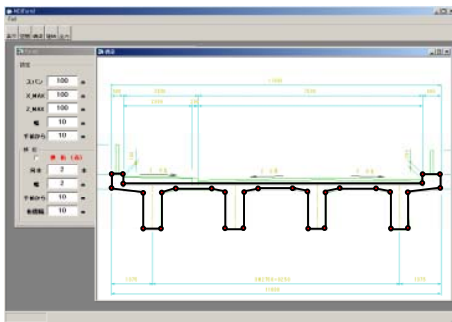


図-4 橋梁モデル作成図

4. 数値解析例

4.1 地形モデル

一般的に、地面の起伏などを考慮した 3 次元解析は、困難な問題の一つである。しかし、飛来塩分量は地形の起伏によっても影響を受けるため、本研究では、地形の起伏状態を考慮に入れた解析を行った。

本解析では、図-5 に示すように沖縄県の東海岸の一部を計算領域とした。

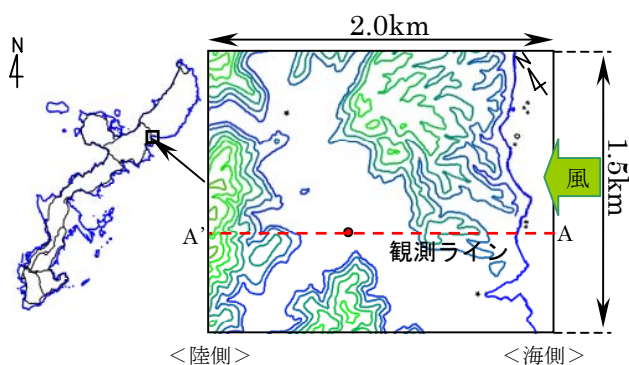


図-5 地形モデル作成のためのコンター図

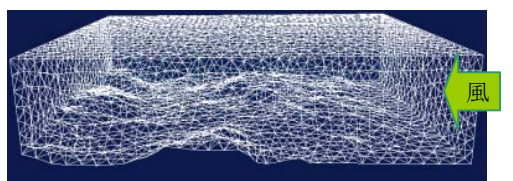


図-6 要素分割図

ここでは、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を行い、参考文献(塩害(I))⁶⁾のウェットキャンドル法による飛来塩分量の実測値(全資料平均)と比較した。

解析条件は、風を海岸線から内陸方向に向かって 5.0m/s の一様な分布で与えた。(沖縄県の平均風速がおおよそ 4.0m~6.0m より) 反対方向の面は透過境界条件とした。また底面(地面)は no-slip 条件とし、それ以外の面に対しては slip 条件とした。

解析で用いる沈降速度(式(20))の係数 W_0, B は大城ら同様、 $W_0 = 0.06$ $B = 0.03$ を用いた。

図-6 に風速場を求めるための要素分割図を示す(節点数 7962, 要素数 37683)。また、飛来塩分粒子は海側の面(高さ 100m まで)から、ほぼ一様に発生させた。なお、本解析では、濃度測定格子を $20 \times 20 \times 20$ m と仮定した。

図-7 は図-5 で示す測定ライン(A-A')での、無次元塩分濃度分布である。なお図-7 の塩害(I)⁶⁾は、平野部における一般的な塩分量の値を無次元化したものである。無次元化するには、海岸からの距離 0m 付近の塩分濃度で除すことにより無次元化を行った。

これより本解析結果は、塩害(I)と比較すると、ほぼ一致しているが、地形を考慮に入れた解析をしているため、勾配が急な所、山の麓では、塩分粒子が吸着し、多少ではあるが塩分量が高くなり、バラツキが生じる。そのために、3 次元的地形形状を考慮する必要があると考えられる。

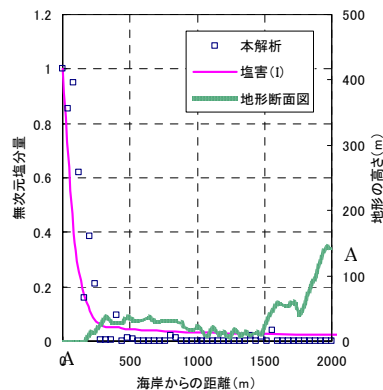


図-7 海岸からの距離と無次元塩分量

4.2 橋梁モデル

ミクロな環境を考える場合に橋梁(T桁)の形状の違いによっても付着塩分量が異なると考えられる。そこで本研究は、**図-8**に示す橋梁モデル(T桁)を用い、下フランジの有無による飛来塩分の挙動を示した。

解析条件、風速及び境界条件等は、前解析と同じである。ただし飛来塩分粒子はy軸方向の中間点からほぼ一様に発生させた。また、構造物に接触する塩分粒子は完全付着とした。次に**表-1**に要素数と節点数を示す。

表-1 要素数と節点数

	節点数	要素数
下フランジ(無)	8756	43108
下フランジ(有)	9169	44090

図-9に全体の風速ベクトル図を示し、**図-10**に、**図-9(a)**で示した番号地点の風速の鉛直分布を示す。これらの図より②の位置で風が吹き抜けていく部分では、風速は速くなっている。しかし、橋梁の張り出し部分では風速が弱まり、風は滞っている。また③、④の位置では主桁間で、⑤の位置では張り出し部分で渦が出来ているのが確認でき、**図-10**の③④⑤からもわかるように、渦が確認できた付近では、マイナス方向の風となっている。

図-11に橋梁(主桁付近)の飛来塩分粒子の移流拡散状態を、(a)粒子発生初期、(b)移流拡散途中、(c)定常状態の三つに分けて示す(海岸から粒子を発生させてから300秒間の粒子分布)。発生した塩分粒子は、最初は順調に流れ進んでいるが、橋梁の張り出し部分付近に近づくと風の勢いが弱まり、張り出し部と主桁の隅付近で、塩分粒子が漂っていることが確認できる。また主桁間では、渦が出来ているため、塩分粒子が主桁と主桁の間に巻き込まれて、進行方向(海側)とは反対側の主桁(陸側)に塩分粒子が付着した。そして、陸側の張り出し部分では、上から流れている粒子と下から流れてくる粒子の双方からの付着が確認できた。

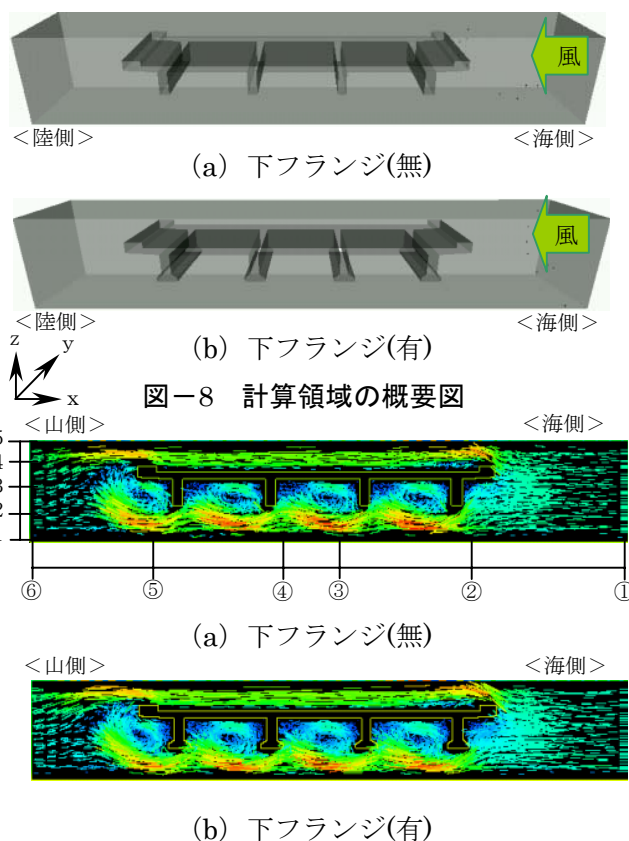


図-9 全体の風速ベクトル

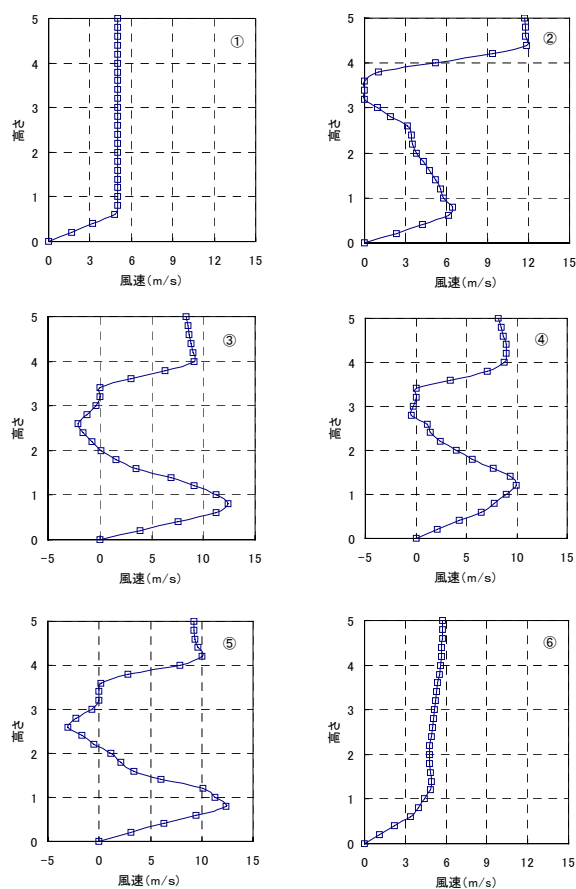


図-10 風速の鉛直分布(中間)

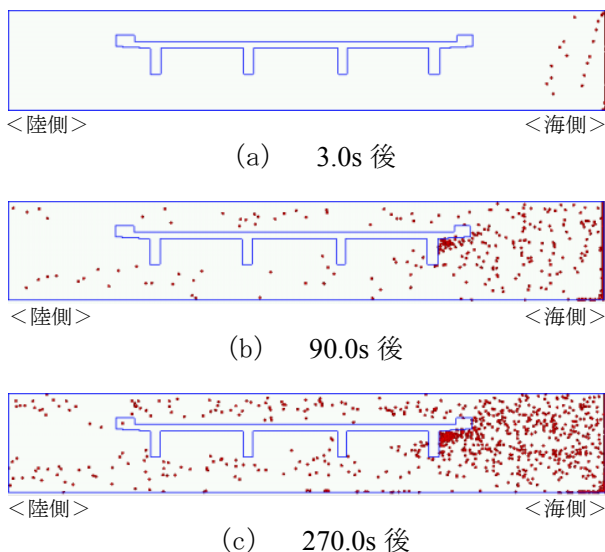


図-11 飛来塩分の移流拡散状況

次に塩分測定領域として、主桁を図-12に示す海側・陸側(左右半分), 及び A・B(上下半分)と定義し、それぞれを比較した。その領域に存在する塩分粒子を測定し、その割合を表-2に示した。また、塩分粒子の最終付着位置を赤丸●で、図-12に表した。

表-2より、下フランジの有無によって、塩分の付着量が異なることがわかる。下フランジ(無)は、主桁の海側ではなく、陸側に多くの塩分粒子が付着している。それに対して、下フランジ(有)は表面積が大きくなるのもあるが、下フランジに付着する塩分粒子割合が高くなっている。そのため、下フランジを設置した主桁の橋梁は、下フランジの部分からの鉄筋腐食が起こる可能性が高くなると考えられる。なお、このような飛来塩分が付着しやすい下フランジは、現在では設計上使用される例が少なくなりつつある。

5. まとめ

本研究では、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を行った。その結果を簡単にまとめると以下になる。

(1)地形の起伏を考慮した飛来塩分の3次元拡散解析法を示した。その結果、飛来塩分の解析は、

表-2 塩分粒子の割合(%)

	陸側	海側	A	B
下フランジ(無)	70.2	29.8	55.0	45.0
下フランジ(有)	42.0	58.0	38.0	62.0

<例> 割合: 陸側(%) = 陸側 / (陸側+海側) × 100

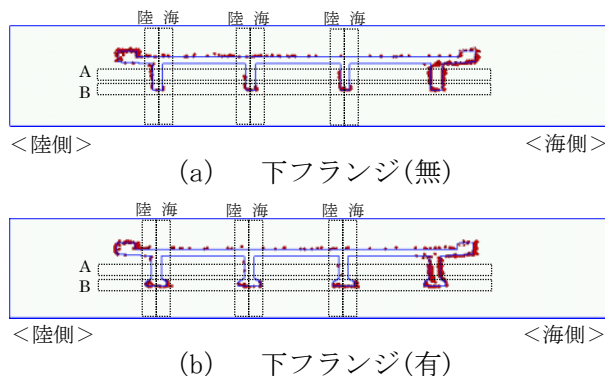


図-12 飛来塩分の最終付着状況

地形の影響を考慮すべきことを示した。

(2)主桁周りでの塩分粒子の挙動の解析を行い、主桁の形状により、塩分粒子の付着する位置が異なることを示した。

今後としては、地形モデルと橋梁モデルとの複合モデルの解析シミュレーションを行う予定である。

謝辞: 本研究を進めるにあたり、東洋大学講師の中林靖先生に貴重なご意見、ご教授を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 伊良波繁雄, 他: 沖縄県でのコンクリート橋の耐久性調査, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No1, pp.191-196, 1998.6
- 2) 室賀啓希, 他: 沖縄県でのコンクリート構造物の耐久性調査と維持管理に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.1, pp.1177-1182, 2001
- 3) LEY, A.J.: A random walk model of two dimensional diffusion in the neutral surface layer, Atmospheric Environment, No.16, pp.2799-2808, 1982
- 4) <http://adventure.q.t.u-tokyo.ac.jp/jp/>
- 5) 大城勝, 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基礎研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No1, 2003
- 6) 仲座栄三, 他: 飛塩(海塩粒子)拡散の数値流体力学的解析, 海岸工学論文集, Vol.40, pp.1036-1040, 1993.8
- 7) 岸谷孝一, 西澤紀照他: コンクリート構造物の耐久性シリーズ 塩害(I), 技報堂出版, 1988.
- 8) 片脇清士: 最新のコンクリート防食と補修技術, 山海堂, 2000