

ランダムウォーク法による飛来塩分の拡散解析

琉球大学 正会員 ○伊良波 繁雄 琉球大学 正会員 富山 潤
 琉球大学 学生会員 入部 綱清 東京大学 非会員 吉村 忍

1. はじめに

沖縄県のような周りを海に囲まれた小さな島々では、海から飛来する飛来塩分による塩害がコンクリート構造物に深刻な問題となっている¹⁾。塩害の特徴は外観と内部損傷との間に極めて大きな落差があり、内部損傷の早期発見が極めて重要である。このため、飛来塩分の移流拡散現象を解析的に求め、評価することは重要な課題である。本研究では、飛来塩分の求解法として、モデル化が容易で、複雑な風速場における拡散現象の予測可能なランダムウォーク法²⁾を採用し、その妥当性を検討した。

2. 風速場

2.1 基礎方程式

非圧縮粘性流体の運動は、以下の連続の式と、Navier-Stokes 方程式によって支配されている。

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

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

ここで、 $\mathbf{u}$ は流速、 ρ は密度、 $\boldsymbol{\sigma}$ は応力である。境界条件は、以下の速度境界条件と表面力境界条件を与える。

$$\mathbf{u} = \mathbf{g} \quad \text{on } \Gamma_1 \quad (3)$$

$$\mathbf{t} \equiv \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{h} \quad \text{on } \Gamma_2 \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\tau} = -p\mathbf{n} + \frac{1}{\text{Re}}(\mathbf{n} \cdot \nabla) \mathbf{u} \quad (5)$$

ここで、 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 $\mathbf{n}$ は境界に対する法線ベクトルを表している。

3. 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、Adv_Fluid_Tet³⁾を用いた。以下にその概略を述べる。Adv_Fluid_Tet では、同じ次数の補間関数をもつ四面体要素 (P1-P1) を用いた同時補間法により有限要素近似し、未知変数の離散化を行う。本研究では上述で示した支配方程式から速度及び圧力に関して次式を得る。

$$(M + M_\delta) \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (N + N_\delta) \mathbf{u} + K\mathbf{u} - (G + G_\delta) \mathbf{p} = 0 \quad (6)$$

$$G^T \mathbf{u} + M_\varepsilon \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + N_\varepsilon \mathbf{u} + G_\varepsilon \mathbf{p} = 0 \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{u}$ は流速、 $\mathbf{p}$ は圧力、 M, N, K, G, G^T はそれぞれ、質量、対流、拡散、勾配、発散を表す全体行列である。

4. 飛来塩分粒子の拡散

4.1 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²⁾。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。

3 次元乱流で i ステップ目の粒子の位置 $\mathbf{x}_i(x, y, z)$ とし、それぞれの速度を $\mathbf{u}_i(u, v, w)$ とする。以下にそれぞれの粒子の位置と速度の関係を示す。

$$\mathbf{x}_{i+1} = \mathbf{x}_i + \mathbf{u}_{i+1} \Delta t \quad (8)$$

ここで、 $i+1$ ステップ時における粒子速度 $\mathbf{u}_{i+1}$ は次式で表される。

$$\mathbf{u}_{i+1} = \alpha \mathbf{u}_i + \boldsymbol{\lambda}_{i+1} \quad (9)$$

ここで、 $\boldsymbol{\lambda}_{i+1}$ 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。

$$\alpha = R(t) = \exp(-\Delta t / \tau_L) \quad (10)$$

ここで、 τ_L はラグランジュの時間スケールである。

4.2 飛来塩分の濃度測定

飛来塩分の濃度に関しては、計算空間をグリッド上に分割(濃度測定格子)して、ある時間のあるグリッド内の個々の粒子がもつ濃度情報より求める⁴⁾。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式(11)で示す無次元濃度 $C_0(z)$ とした⁵⁾。

$$C_0(z) = \exp(Az) \quad (11)$$

キーワード 飛来塩分, ランダムウォーク法, 塩害, 数値解析

連絡先 〒903-0129 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地 琉球大学工学部環境建設工学科 TEL098-895-8649

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(11)をもとに式(12)より各グリッド内にある時間あたりの塩分濃度 C_{flax} を次式で求める⁴⁾。

$$C_{flax} = k \sum_{i=1}^N C_0(z) / (V \cdot t) \quad (12)$$

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。

本研究では、粒子の沈降速度 $W(x, z)$ も考慮に入れ、次式を仮定した。

$$W(x, z) = W_0 \exp(-B(x+z)) \quad (13)$$

ここで、 W_0 は砕波位置での粒子の降下速度、 B は定数である。

5 数値解析例

ここでは、図-1に示すように沖縄県の東海岸の一部を計算領域とした解析と図-3に示す橋梁主桁周辺における飛来塩分の挙動の解析を行った。解析条件は、風を海岸線から内陸方向に向かって5.0m/sの様な分布で与えた。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、それ以外は面に対してのみ風速ゼロとした。また、飛来塩分粒子は海岸線位置の面から高さ100mまでほぼ均一に発生させた。なお、解析では濃度測定格子を $20 \times 20 \times 20\text{m}$ とした。解析で用いる沈降速度(式(13))の係数 W_0, B は大城行った方法⁴⁾を用いた($B=0.03, W_0=0.06$)。図-2は図-1に示す測定ラインでの、無次元塩分濃度分布である。これより本解析結果は、平野部における一般的な塩分量(塩分(I))⁶⁾とほぼ一致しているのが、本結果は地形を考慮しているため、多少ばらつきがある。

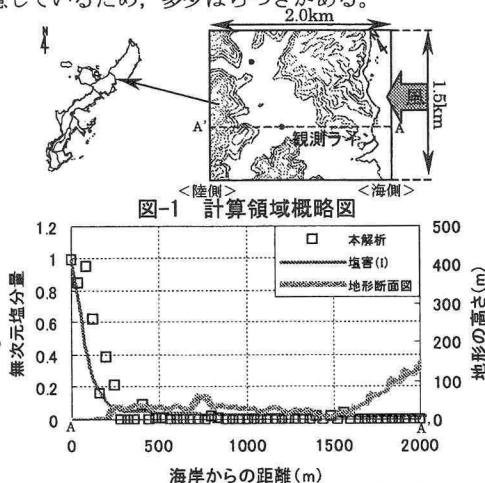


図-2 飛来塩分粒子の無次元塩分濃度分布

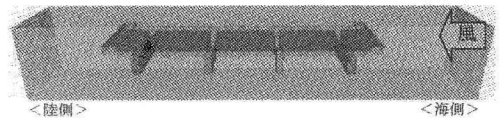


図-3 計算領域概

次に示す橋梁モデルの解析例を示す(図-3)。解析条件は、前解析例と同じである。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。

図-4に橋梁(主桁付近)の飛来塩分粒子の移流拡散状態を示す。(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。

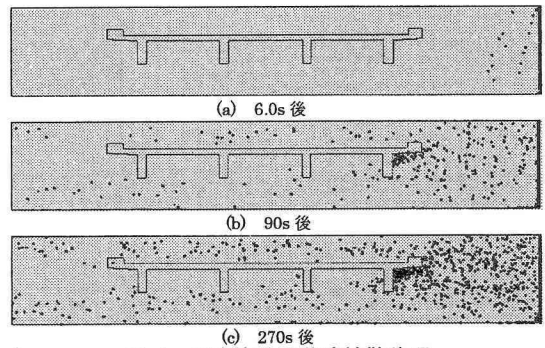


図-4 飛来塩分の移流拡散状況

図-4に示すように、本解析結果は橋梁の主桁周りに飛来塩分が巻き込まれ、海側の主桁に付着する状況を示すことができ、飛来塩分の移流拡散現象のシミュレーションを比較的よく表現できていると考えられる。

6 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現象のシミュレーションを示した。今後、実際の地形モデルと橋梁のモデルの複合を行う予定である。

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) LEY, A. J., : A random walk model of two dimensional diffusion in the neutral surface layer, Atmospheric Environment, No. 16, pp. 2799-2808, 1982
- 3) <http://adventure.q.t.u-tokyo.ac.jp/jp/>
- 4) 大城勝, 他: 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的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 25, No1, 2003
- 5) 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
- 6) 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(1), 技報堂出版, 4p, 1988. 9