

コンクリート構造物への飛来塩分の影響因子に関する感度解析

コンクリート研究室 永島 勝
指導教官 下村 匠

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の建設の企画設計段階において、メンテナンスフリーを前提に最適化した設計や工法を適用するのではなく、建設後の維持管理を考慮に入れた設計や工法を適用することの重要性が指摘されている。そのため、建設後の構造物の劣化やこれに伴う性の低下を精度良く予測する手法が必要である。

鉄筋コンクリート構造物の耐力低下の主要因には、海から飛来する塩分による劣化がある。構造物に到達する飛来塩分は、風および波などの巨視的な条件だけではなく、構造物形状および周辺地形など局所的な条件の影響を受けることが知られている。そのため、これらの条件を考慮可能な手法によって、構造物に到達する飛来塩分を評価することが望まれる。

現在、塩害による劣化を予測する場合には、コンクリート標準示方書の構造物の使用照査および耐久性能照査で示されている、海岸からの距離に応じた表面における塩化物イオン濃度を与えることが多い。しかし、飛来塩分は風や波などの気象条件や地形あるいは構造物自身の形状に影響されるため、実際には同じ距離に置かれた構造物であっても表面塩分量が大きく異なる。

本研究では、波や風などの気象条件、海岸からの距離、構造物形状、周辺地形などの幾何学的条件が、沿岸部に置かれた構造物に到達する飛来塩分量に与える影響を、数値シミュレーションによりどの程度の精度と適用性をもって表現できるか検討した。数値シミュレーション法は、海岸工学分野において開発された山田・細山田の方法¹⁾を採用した。

2. 飛来塩分の発生と移動のモデル

2.1 計算フロー

本研究で用いる山田らの数値計算法のフローチャートを図-1に示す。まず、計算の対象とする地形の境界条件および波や飛来塩分に関する初期条件を与えた後、風の場合、非線形性を考慮した波浪場の計算を行う。続いて、非定常緩勾配方程式の砕波モデルにより波の砕波の判定を行い、砕波が判定されると飛来塩分の発生量の計算を行う。続いて、風の場合の解を用いて、大気中における飛来塩分の移流拡散の計算を行う。つまり、飛来塩分の計算においては、風は定常状態を仮定する。次に、時間ステップを更新し、波浪場の計算と飛来塩分の移流拡散の計算を繰り返す。

なお、本研究では、2次元の問題を対象とする。

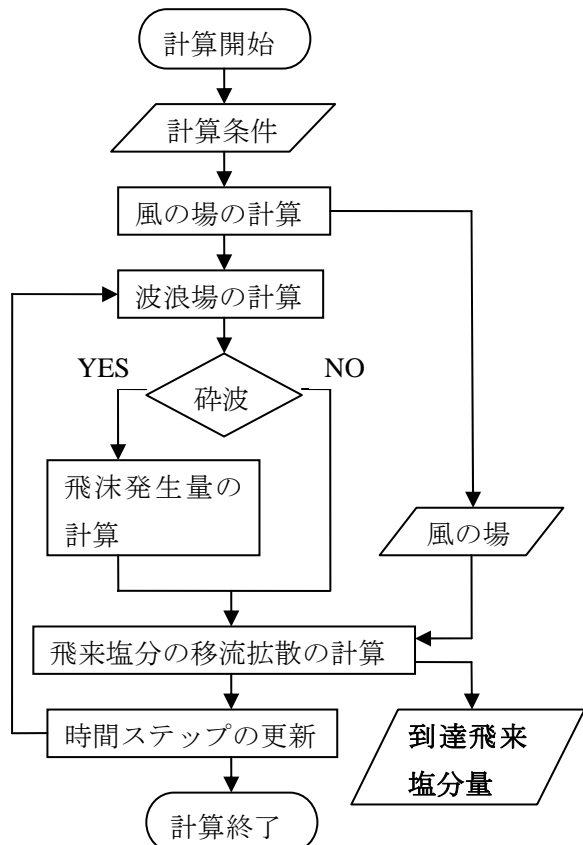


図-1 計算のフローチャート

2.2 風の場合

Navier-Stokes 方程式と連続式より式(1)の Poisson 方程式が導かれる。これをもとに風の場合の計算を行う。空気は非圧縮性と仮定する。数値計算法は SOLA 法で行う。

$$-\frac{\partial D}{\partial t} + \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + 2\frac{\partial v \partial u}{\partial x \partial y} = -\frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{1}{Re} \left(\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

ここで、 u , v , P , Re はそれぞれ水平速度、鉛直速度、圧力、レイノルズ数である。また、 D は発散を表し式(2)で表される。

$$D = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \quad (2)$$

2.3 飛来塩分の発生モデル

海から飛沫が発生するメカニズムは、大きく分けて、a) 砕波によって発生する、b) 海水が風によって海面からちぎれて発生する、の二つのパターンがある。さらに、砕波による飛来塩分の発生には、a1) 砕波によって海水中に混入された気泡が海面で破裂した時に発生する、a2) 砕波によってちぎれた海水が大気中に飛散することによって発生する、の二つのパターンがある。a1) による飛沫は粒子径が小さく風に乗って遠くまで運ばれるが、その他のパターンでは飛沫の粒子径が大きく、大部分の飛沫はすぐに落下する。海岸近くの陸上に存在する構造物に到達する飛沫を対象とする場合は、a1) の砕波の気泡によって発生する飛沫のみを考慮すればよい。

気泡によって発生する飛沫量は、砕波による波のエネルギー損失量が気泡の発生量に比例するとし、式(3)、(4)より求める。

$$V_{air} = a \cdot W_{loss} \cdot D_{air}^3 \quad (3)$$

$$C = V_{air} \left(\frac{D_{salt}}{D_{air}} \right)^3 \quad (4)$$

ここで、 V_{air} , a , W_{loss} , D_{air} はそれぞれ気泡生成

体積、比例係数、波の砕波によるエネルギー損失量および気泡の直径である。また、 C , D_{salt} は飛沫発生量、飛沫の直径である。気泡の直径と飛沫（水滴）の直径の関係は、図-2に示した Wu(1979)の研究の結果を用いた。しかし、砕波から発生する気泡の直径は未解明であるため、気泡直径は一定の値を与えた。本研究では、すべての飛来塩分発生量の計算において気泡の直径を 3.5mm、飛沫の直径を 0.55mm とした。

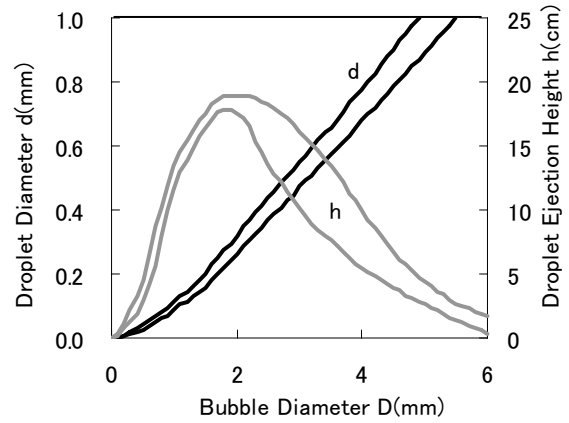


図-2 気泡の直径と飛散する水滴の性質の関係

2.4 飛来塩分の移動モデル

飛来塩分の移動は、式(4)に示す移流拡散方程式に基づき計算を行った。

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + (w - w_s) \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} \right) - Q \quad (4)$$

ここで、 w_s , Q , k はそれぞれ飛来塩分粒子の沈降速度、塩分吸収量、乱流拡散係数である。塩分吸収量は樹木や建物の飛来塩分遮蔽吸収効果を考慮できるように式に取り入れたものである。飛来塩分粒子の沈降速度は、式(5)、(6)、(7)において、沈降速度 w_s の初期値をストークスの沈降速度として反復計算を行って求めた。

$$C_d R_e^2 = \frac{4}{3} \frac{D_s^3}{\mu} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g \quad (5)$$

$$C_d = \frac{24}{R_e} (1.0 + 0.150 \cdot R_e^{0.687}) \quad (6)$$

$$R_e = \frac{D_s \cdot w_s}{\nu_{air}} \quad (7)$$

ここで、 C_d 、 R_e 、 D_s 、 μ 、 ρ_s 、 ρ_f はそれぞれ抵抗係数、レイノルズ数、飛来塩分の直径、空気の粘性係数、飛来塩分の密度および空気の密度である。また、ここでの飛来塩分の直径の値は式(4)における飛沫の直径の値とは一致させていない。以降、飛来塩分の直径とは、式(7)における飛来塩分の直径のことを指す。

3. 感度解析

3.1 計算条件

構造物に到達する飛来塩分に対する影響因子の感度解析を行うために、図-3のような600m×60mの範囲の2次元の解析対象モデルを設定した。図中の陸上に設置した構造物に到達する飛来塩分量の計算を行う。波は、海岸から150m沖の地点で発生させた。波の発生点によって発生する飛来塩分量は変わるが、本研究ではすべてこの条件にした。風は海側から陸側に向かって設定する。また、構造物の周辺地形による影響を検討する場合には、構造物の背後に壁を模擬した壁を設置する。計算に用いた主な条件を表-1に示す。風速は風の場の計算を行なう際に使用する初期水平風速である。

図-4は構造物付近の風の場の計算結果を示したものである。線の長さが風の大きさを表している飛来塩分の移流拡散過程の数値解析は差分法により行った。構造物に到達する飛来塩分量は、到達飛来塩分量が安定してから5分間の値の平均値を用いた。

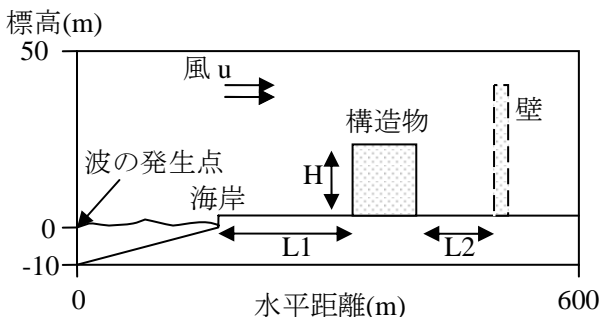


図-3 解析対象モデル

表-1 計算条件

構造物と海岸の距離 L1	50m
構造物の高さ H	5m
壁の距離 L2	∞m (壁無し)
風速 u	5m/s
飛来塩分の直径	0.05mm
波の波高	4m
波の周期	9s
式(2)の比例係数	1.0
時刻間隔	0.1s
水平方向刻み幅	1.5m
鉛直方向刻み幅	0.25m

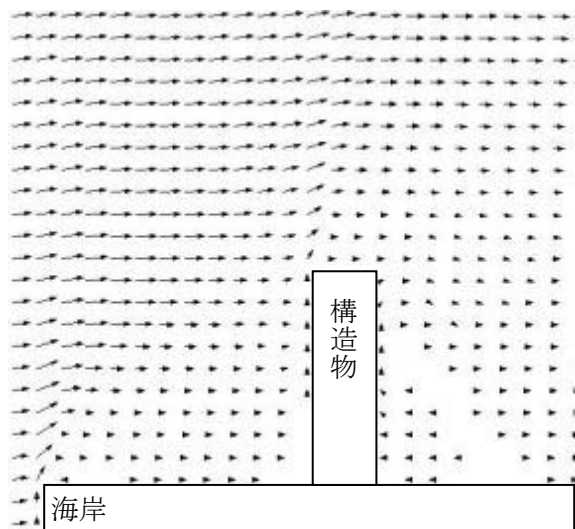


図-4 構造物付近の風の場のベクトル図

3.2 海岸からの距離

図-5は、構造物と海岸の距離 L1 を 5m, 50m および 250m とした場合の、構造物に到達した飛来塩分量 ($\text{mg}/\text{dm}^2/\text{day}$) を示したものである。

海岸からの距離 50m および 250m の構造物では、構造物の海側の面における飛来塩分量は、地表から高くなるにつれ増加している。これは、構造物の手前で上昇気流が発生するためである。しかし、海岸からの距離 5m の構造物では、逆に飛来塩分量は高いところほど減少している。こ

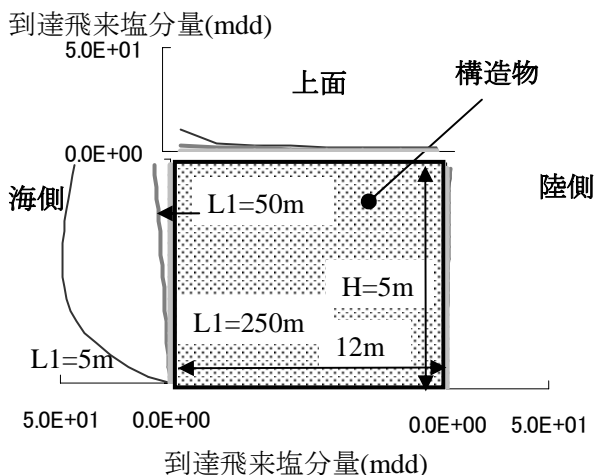


図-5 海岸からの距離 L1 を変化させた場合の到達飛来塩分量

これは、海岸からの距離が非常に近いために、飛来塩分が構造物の表面に直接到達するためであると考えられる。

また、構造物の上面では、海側ほど到達飛来塩分量が多くなっている。これは、構造物の手前では上昇気流が発生し、飛来塩分が構造物を乗り越えようとするからである。また、構造物の陸側の面では、他の面に比べ小さな値となった。

コンクリート標準示方書の構造物の使用性照査では、海岸からの距離に応じて、コンクリート表面における塩化物イオン濃度が示されている。図-6に、本研究で得られた到達飛来塩分量の計算結果と、示方書に示された表面の塩化物イオン濃度の比較を行う。示方書の系列の縦軸は、海岸から100mのコンクリート表面における塩化物イオン濃度を1とした値、計算値の系列は、海岸から100mの到達飛来塩分量を1とした値である。

示方書と計算値とでは、距離による減衰の様子が異なっている。この原因は、計算値は到達塩分量であるが示方書はコンクリート表面に到達した飛来塩分が付着し雨などによる洗い流しの影響を受ける表面塩分量であること、計算で仮定した粒子径や粒子の沈降速度が現実をよく表していないこと、などが考えられる。

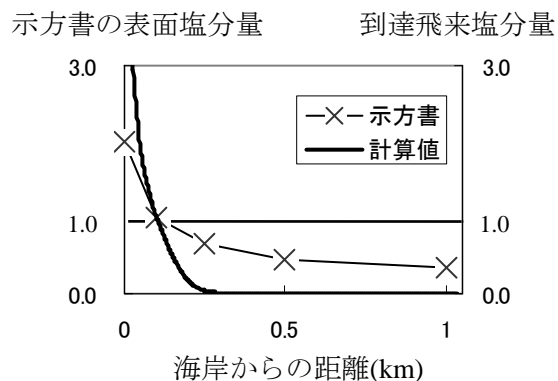


図-6 示方書の表面塩分量と到達飛来塩分量の計算値との比較

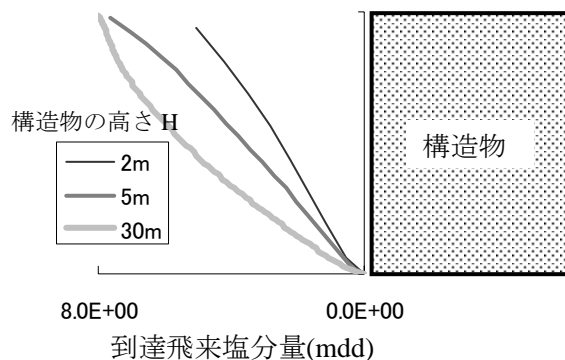


図-7 構造物の高さ H を変化させた場合の到達飛来塩分量 (海側)

3.3 構造物の高さ

構造物の高さ H を 2m, 5m および 30m とし、構造物に到達する飛来塩分量の計算を行った結果を図-7に示す。なお、縦軸はそれぞれの構造物の高さ H を 1 とした無次元量で示した。

構造物の高さが高いほど海側の面で到達飛来塩分量が多かったのは、構造物の高さが高くなると構造物の手前で風速の弱い領域が多くなるため、飛来塩分が構造物を乗り越えることが出来なくなり、構造物の手前で飛来塩分が停滞したためであると考えられる。

3.4 壁

周辺の地形が構造物に到達する飛来塩分量に与える影響を調べるために、構造物の背面に壁を設置し、構造物と壁の距離 L2 を変化させ計算を行った。構造物と壁の距離を 5m, 10m および

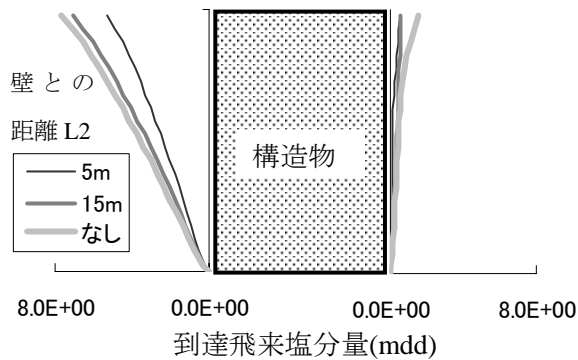


図-8 壁の距離 L2 を変化させた場合の到達飛来塩分量（海側と陸側）

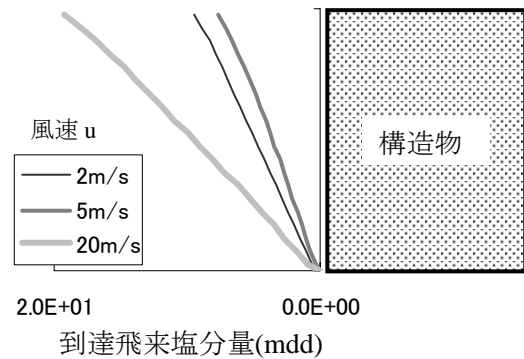


図-9 風速 u を変化させた場合の到達飛来塩分量（海側）

壁なしとした場合の結果を図-8に示す。

壁があることによって、構造物手前で上昇気流が発生し飛来塩分が構造物に到達しにくくなるために壁との距離が短くなるほど到達飛来塩分量が少なくなる結果となったと考えられる。

3.5 風速

風速 u を 2m/s, 5m/s および 20m/s とした場合の構造物に到達する飛来塩分量を図-9に示す。

風速が大きくなるほど、到達飛来塩分量が多くなると考えられるが、風速 5m/s では、風速 2m/s の到達飛来塩分量より少なくなるという結果となった。この原因としては、飛来塩分が地表へ落下して消滅することが考慮できていないため、本来構造物に到達しない飛来塩分が多く到達したためにこのような現象が起きたと考えられる。また、実際には風速が大きくなれば波高が高くなり飛沫の発生量が多くなるが、計算では波高は一定として計算していることにも原因があると考えられる。

3.6 飛来塩分の直径

理想的には、飛来塩分の直径は、飛来塩分の発生機構モデルにより決定するべきであると考えている。しかし、現段階ではまだ検討が及ばないため、飛来塩分の直径を変化させた場合の到達飛来塩分量の計算を行った。その結果を図-10に示す。飛来塩分の直径が大きくなれば沈降速度が大きくなり構造物に到達する前に多くが

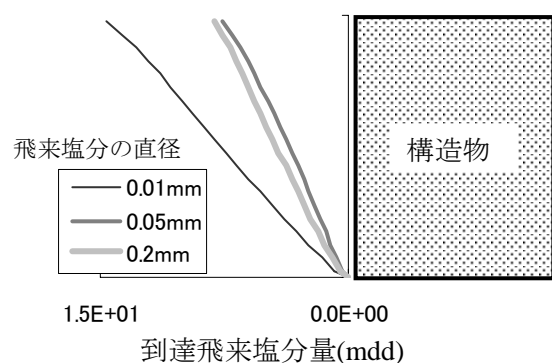


図-10 飛来塩分の直径を変化させた場合の到達飛来塩分量（海側）

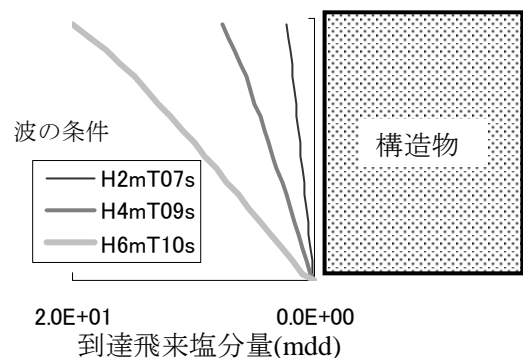


図-11 波の条件を変化させた場合の到達飛来塩分量（海側）

落下するので、飛来塩分の直径が大きいほど到達飛来塩分量が少なくなると考えられる。しかし、計算の結果では、飛来塩分の直径が 0.05mm の場合よりも 0.2mm の方が、到達飛来塩分量がわずかに多くなるという結果となった。これは、風速の感度解析でも述べたように、飛来塩分の地表への落下が考慮できていないためであると考えられる。

表－2 観測地点の計算条件と飛来塩分量の実測値と観測地

観測地点	海岸からの距離(m)	標高(m)	風速(m/s)	波高(m)	実測値(mdd)	計算値(mdd)
A	0	10	1.0	1.3	3.92	11.76
B	150	4	0.6		16.78	0.00
C	450	7	1.9		1.08	0.00
D	1000	15	1.9		0.75	0.00

3.7 波

波の波高，周期を変化させた場合の結果を図－11に示す。波高が大きくなると，砕波が起きやすく，また砕波による波のエネルギー損失量が大きくなるために，飛沫発生量が多くなり到達飛来塩分量が多くなっている。

4. 実測値との比較

新潟県において測定された実測値²⁾との比較を行う。実測値は，1992年10月～1994年12月までの2年2ヶ月に渡って，土研式塩分捕集器を用い新潟県内の15箇所で測定された結果の中から抽出した。表－2に示すA，B，C，Dの4箇所を選び出し，本研究で用いた数値解析法により飛来塩分量の計算を行った。計算で使用し風速は，各地点の近くの気象観測所のデータから，波の波高と周期は，新潟沖で観測されたデータ³⁾を平均したものを，波の発生点を海岸から150m沖とした。構造物全体に到達した飛来塩分量の平均値と，捕集器で測定された飛来塩分量との間で比較を行った。表に示した値は1993年3月の値である。B地点は，海岸に消波ブロックが設置されており，飛沫が多く発生する要因があるために他の地点に比較し実測値の飛来塩分量が多くなっている。

A地点以外の計算値は0.00となった。実測値と計算値が異なる理由として現段階で考えられるのは，a)風速，波のデータとして，年間の平均値よりも大きな値を与える必要があること，b)砕波によって発生する飛沫の直径が正しく評価出来ていないこと，c)砕波に影響を及ぼす海岸

の様子，例えば砂浜，岩礁，消波ブロックの有無などを考慮していないこと，などある。実測値と計算値との違いの原因については，このような検討をさらに詳細に進めることで，もう少し的を絞れると思われる。今後も検討を続ける予定である。

5. まとめ

山田・細山田により開発された，飛来塩分の数値シミュレーションモデルを用いて，海岸から構造物への飛来塩分の影響因子の感度解析を行った。海岸からの距離や風などによって構造物に到達する飛来塩分量が変わることを数値解析によって表現できることを確認した。

また，実測値との比較を行い，現段階では，実構造物の飛来塩分量を精度良く予測できるレベルではないことが明らかとなった。その原因解明は，本研究で行った感度解析の方法論に基づき，進めることが可能と思われる。

参考文献

- 1) 細山田 得三，山田 文則，田安 正茂：波動場数値計算の砕波判定によって発生する飛来塩分とその輸送に関する数値実験，海岸工学論文集，第49巻，pp.1256-1260，2002
- 2) 土木学会新潟会：コンクリート構造物の塩害およびその対策に関する調査研究委員会報告書，その2，pp.1-30，1995.3
- 3) (財)沿岸開発技術研究センター：全国港湾海洋波浪観測25ヶ年統計資料，pp.422-423，1996.1