

ポストテンションT型桁橋への飛来塩分シミュレーションの試み

オリエンタル建設(株)技術研究所 ○小川 彰一
 オリエンタル建設(株)技術研究所 正会員 江口 信三
 (株)計算力学研究センター技術開発部 篠崎 貴浩

1. はじめに

海岸付近に建設されるコンクリート構造物では、海から飛来する塩分がコンクリート表面に到達し、さらにコンクリート中に浸透して鋼材を腐食させる塩害が生じることが知られており、この飛来塩分がコンクリートの耐久性を低下させる要因となっている。そして、海から飛来する塩分は、海岸付近で破砕されて生成する海水滴や、海水気泡が破裂する際に大気中に放出される海塩粒子が風に乗ってコンクリート構造物まで運ばれると考えられる¹⁾。

一方PC桁の飛来塩分による塩害劣化では、海側に位置する桁だけでなく陸側に位置する桁にも損傷が認められ、また下フランジだけでなく上フランジの下面にも損傷がある場合があり、構造物の立地条件によって損傷箇所が異なるようである。そしてPC桁への塩分浸透量を測定した報告では、海側の塩分浸透量が山側より卓越している報告があり²⁾、またPC桁への飛来塩分の付着量は、構造物の場所によって異なることが知られている。

構造物の立地条件あるいは構造物の位置によって異なる飛来塩分量の予測は、構造物の設計において耐久性を確保するために必要な塩分浸透量の予測や、構造物の補修における調査部位の絞込みに有用であると考えられる。しかしながら、海岸から飛来する塩分量については数値的解析が試みられている^{4,5)}が、構造物の部位によって異なる飛来塩分量については解析された例は少ない。

そこで本報告では、海岸付近に建設されるポストテンション方式T型桁を想定して、海から飛来する塩分をFEMによる数値解析でシミュレーションし、構造物に到達する飛来する塩分量について検討を行った。

2. 解析手法

飛来塩分のシミュレーションでは、モデル形状としてポストテンションT型桁を想定し、二次元での解析を行った。解析では、エアロゾルの挙動解析を行った例⁶⁾を参考として、海から吹く空気の流れ場を解き、飛来塩分としては流れ場によって輸送される粒子の桁への付着を粒子モデル、桁に運ばれる塩分量は濃度として無次元塩分濃度に対する拡散方程式を解く濃度表現モデルによって評価した。解析には汎用流体解析プログラムFIDAP 8.6を用いた。

2. 1モデル形状

モデルとしたポストテンションT型桁は、幅員12.2m、桁高1.5m、主桁6本、海面から主桁下縁までの高さ6mとした。解析に用いたメッシュは、格子間隔0.1mを基本としたPave法による分割を行い、線形要素で総計約52,000節点とした。

2. 2流れ場の計算

流れ場の計算では、空気のReynolds数が高いことから乱流モデルである標準的なk-εモデルを適用し、式(1),(2)に示した運動量保存式を基本とした。

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j u_{i,j} \right) = \sigma_{ij,j} + \rho f_i \quad (1)$$

$$\sigma_{ij} = -p \delta_{ij} + \mu (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (2)$$

ここに、 ρ は空気密度=1.205kg/m³、 μ は空気粘度=18.4x10⁻⁶Pa・s、 u_i 、 $u_{i,j}$ は風速、 σ_{ij} は応力、 f_i は体積力、 p は

圧力、 δ_{ij} は Kronecker のデルタ、 i, j はそれぞれ 1, 2 である。

風速は、海岸より海側 5m に設定した鉛直境界上で X 方向風速を 5m/s、また波しぶきが上がることを想定して海面上の Y 方向の風速を 1m/s とした。

2. 3 濃度表現モデル

塩分は、海岸上空に存在する塩分と、海岸付近で生成する塩分を与えた。解析では化学種として塩分を取り扱い、拡散方程式を解くことによって評価した。境界条件として与えた塩分は、海岸上空の塩分として上空にいくほど塩分濃度が指数的に減衰するとした報告⁴⁾を参考とし、海岸より海側 5m に設定した鉛直境界上で鉛直方向(y)に式(3)で示した塩分濃度を与えた。

$$C_{in}(y) = \exp[-2.66 \cdot \log(y+1)] \quad (3)$$

ここに、 $C_{in}(y)$ は鉛直方向の塩分濃度で、空気中の塩分濃度と測定される付着塩分量との関係が明確でないため、無次元濃度とした。

また、海岸で生成する塩分は海岸の形状によって異なると考えられるが、本解析では鉛直方向で与えた塩分量の 10 倍の塩分が生成するものと仮定した。

2. 4 粒子モデル

基礎方程式として式(4)に示した Lagrange 粒子軌道方程式⁷⁾を用い、海から飛来する塩分である海塩粒子がキャリア流体である空気によって運ばれ、蒸発しない液滴として粒子の慣性力、重力沈降を考慮し、粒子間干渉はないものとして、海塩粒子の桁への付着の様子をシミュレーションした。

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{1}{\tau}(u_f - u_p) + \left(\frac{\rho_p - \rho_f}{\rho_p} \right) \cdot g + f \quad (4)$$

ここに、 u_p は空気の流速、 u_f は粒子の流速、 τ は粒子緩和時間、 ρ_p は粒子密度、 ρ_f は空気密度、 g は重力加速度、 f は粒子に作用する合力を表す。

粒子密度は、おおよその海水密度である 1.03g/cm³とし、粒子は海岸より海側 4m、高さ 0~7m の範囲に 1000 の粒子を生成させた。

3. 結果と考察

3. 1 空気流れ場

空気全体の流れは、海からの風に対して、まず海側である G1 桁に風があたり、桁を大きく避けるように空気が流れていて、T 桁橋の下側を迂回した空気が G6 桁の海側面にあたる傾向にあった。

図-2 に、海側に位置する G1~G2 および陸側に位置する G5~G6 付近の流速を示した。G1 桁の海側ウェブ下付近での流速が特に速く、また桁間内部で空気が巻いており、飛来する塩分が上フランジ下面や桁の陸側面まで運ばれると考えられる。

飛来する海水の粒子は風によって運ばれ、付着面に対して粒子の慣性力が大きいほど付着量が増大する、すなわち付着面であるコンクリート面の

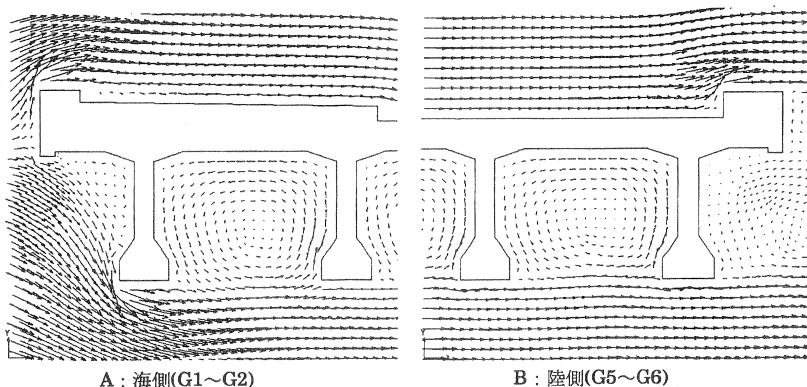


図-1 桁付近の空気流れ

法線方向に速い流速がある場合に付着量が増大すると考えられる。そこで、流速に着目すると、桁間内部の流速は、G1～G6の何れの桁間でも特に下フランジの海側ハンチ部分の流速と上フランジの下面中央付近の流速が速く、また、各桁ともにウェブの陸側より海側の流速が速い。

一方、風向に着目すると、海からの風が直接あたる G1 桁の下フランジ海側面のハンチ部分付近、G2～G6 桁の下フランジ海側面の下付近、G2～G6 桁の下フランジ陸側のハンチ部分において、コンクリート面に対して法線方向に風向きがあることが判る。

これらのことから、塩分の付着量は下フランジの海側、下フランジの陸側ハンチ部分、上フランジ下面で付着塩分量が多く、また、何れの桁でも海側の付着塩分量は陸側より多いと推測される。

3. 2 濃度表現モデル

濃度表現モデルを用いて、下フランジのあるタイプを用いた濃度表現モデルを用いた解析結果を図-2に示した。海岸付近で生成した塩分は空気の流れによって T 桁橋まで運ばれ、塩分濃度は G1 桁で低く、陸側に位置する G6 桁で高い結果となった。また塩分濃度は G6 桁では海側の塩分濃度が陸側の塩分濃度に対して卓越していたが、その他の桁ではむしろ陸側の塩分濃度が高い。

コンクリートに供給される塩分量は、海上および海岸線での塩分の生成量、塩分の拡散、風速などの条件によって異なると考えられ、また空気中の塩分濃度が高いことが直接コンクリートに付着する塩分量と等しくなるとは言えないが、少なくとも桁周辺の空気中の塩分濃度は最も陸側である G6 桁の下フランジ付近で高くなると考えられ、陸側の桁が損傷する要因の一つであると推測される。

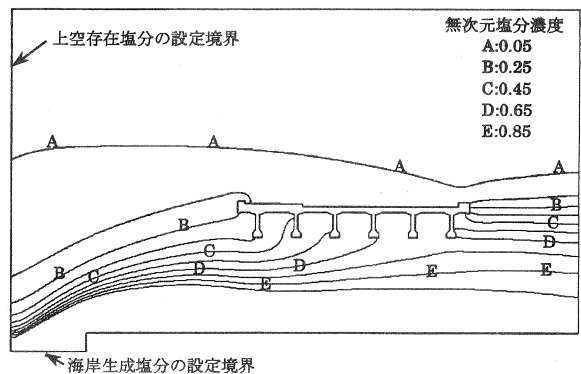


図-2 濃度表現モデルでの塩分濃度分布

3. 3 粒子モデル

海塩粒子の直径は3～18 μm 程度^りであることから、おおよその平均である10 μm 、小さい海塩粒子として3 μm 、そして海岸で破碎され生成した粒子は比較的大きいことが想定されることから100 μm の粒子について、解析した粒子軌道を図-3に示した。

海塩粒子を模した、粒子径が3 μm および10 μm の粒子軌跡では、桁付近の空気の流れ場に沿って桁の周辺に多く飛来している様子が判る。桁に飛来した粒子は、桁間では渦を巻き、また一部の粒子は桁を過ぎてから戻るようにしてG6桁の陸側に到達した。粒子の付着する部位は、下フランジの底面および下フランジ海側の側面が多く、G2～G4桁で多く付着する傾向にあり、何れの桁でも陸側より海側での付着量が卓越しているようであった。また、最も海に近いG1桁の海側面への粒子の付着はそれほど多くは認められない。

一方、粒子径が100 μm と大きくなると、一部は空気流れ場に沿って橋上空を通過するが、殆どの粒子は重力によって沈降した。一部粒子は下フランジや上フランジ下面への付着が認められたが、付着粒子数は多くないようであった。粒子径の大きいものは重力による沈降の影響が大きく、海岸付近の岩場等で波の破碎により生成する比較的大きな粒子は、解析で設定した風速5m/sでは桁に運ばれる粒子数は少なく、また構造物の高さが付着数に大きく左右すると考えられる。

塩害を受けるT型桁では、海側の桁だけでなく陸側の桁でも損傷を受け、また場合によっては最も海側の桁よりむしろ海側から2～3本陸側に位置する桁や、最も陸側の桁の損傷が激しいことがある。その原因として、コンクリートの含水率の違いなど、コンクリートの置かれた環境条件が左右することが報告³⁾されている。しかしながら、本解析で用いた粒子モデルでの解析の結果、桁へ付着する塩分自体が構造物の部位によって異なることが明らかとなった。粒子モデルを用いた解析では、構造物の部位によって異なる付着塩分

量の算出までっていないが、構造物の置かれた海岸からの距離、高さ、形状と周囲の地形などから、構造物に到達する塩分量、あるいは損傷が生じ易い個所の推定ができるものと思われる。

4. おわりに

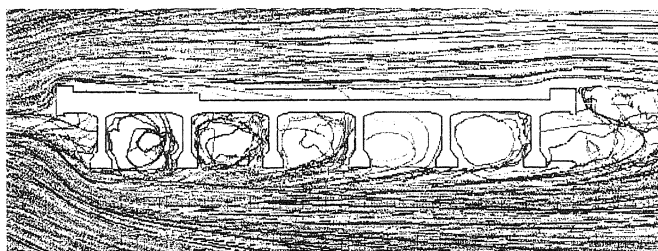
海岸付近に建設されるポストテンションT型桁を想定して、海から飛来する塩分を濃度表現モデルおよび粒子モデルによる FEM の数値解析でシミュレーションし、構造物に到達する飛来する塩分について検討を行った。

その結果、空気は桁間内で渦を巻くように流れ、飛来した塩分がウェブの陸側面や上フランジ下面にまで供給され、また濃度表現モデルを用いた解析では、海側に位置する G1 桁よりむしろ陸側に位置する G6 桁で高い塩分濃度となり、また粒子モデルを用いた解析では桁への海塩粒子の付着の様子から、コンクリートの部位で異なる供給塩分量の違いを推定できると考えられる。何れのモデル

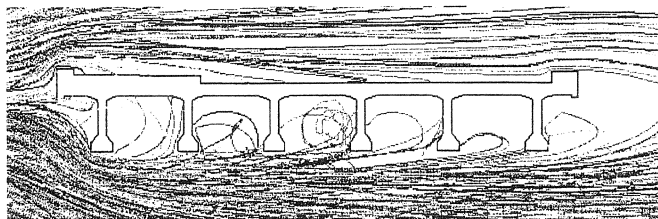
でも、境界における生成塩分量の設定など実構造物における塩分の供給を推定するのに必要なデータが不足しており、また解析モデルでは粒子間の相互作用を考慮できないなど今後改善すべき点は多いが、コンクリートへの塩分供給量の推定に有用なモデルとなると考えられる。

参考文献

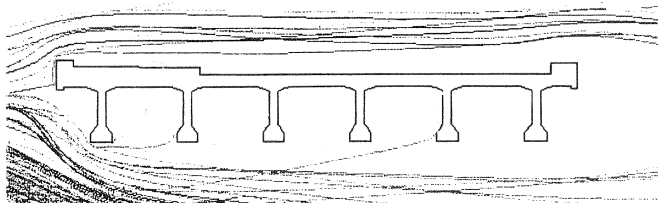
- 1) 岸谷孝一・西澤紀昭ほか編：コンクリート構造物の耐久性シリーズ塩害(I)，技報堂出版，1986
- 2) 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向(その2)，コンクリート技術シリーズ40，土木学会，2000
- 3) 金谷光秀・柘田佳寛・阿部道彦・西山直洋：海岸に暴露したコンクリート中の塩化物イオン拡散性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.747～752，1996
- 4) 山田義智・大城武・柘田佳寛・伊部博：海岸から飛来する塩分量の数値解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp.945～950，1996
- 5) 武田勝昭・加藤真志：津地区での飛来塩分シミュレーションの試み，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，共通セッション，pp.178-179，2000.9
- 6) 熊井規・佐々木隆：有限要素法によるエアロゾル挙動の数値計算，エアロゾル研究，Vol.10，No.2，pp.119-125，1995
- 7) Berlemont, A., Desjonqueres, P., and Gouesbet, G. : Particle Lagrangian Simulation in Turbulent Flows : Int. J. Multiphase Flow , 16 , pp. 19 - 34, 1990



(A)粒子径 $3\mu\text{m}$



(B)粒子径 $10\mu\text{m}$



(C)粒子径 $100\mu\text{m}$

図-3 粒子軌跡