論文 数値シミュレーションを援用した構造物各部位の到達塩分量の予測 手法

中村 文則*1・下村 匠*2・生田 麻実*3・細山田 得三*4

要旨:コンクリート構造物各部位に到達する塩分量を高精度で再現・予測する場合,詳細かつ長期の風況及 び波浪データを用いて塩分量を再現・予測する手法が有効的である。本研究では,数値シミュレーションを 援用した橋桁各部位の飛来塩分の再現・予測手法を提案し,数時間単位の風況及び波浪条件を用いて5年間 の橋桁各部位に到達する塩分量の再現計算を行った。さらに、5年間実施した飛来塩分及び風況の現地観測結 果を整理し,その関係について検討した。その結果,本計算手法により,詳細な風況及び波浪条件から構造 物各部位に到達する飛来塩分量を再現できることが明らかになった。 キーワード:飛来塩分,塩害,数値シミュレーション,現地観測

1. はじめに

海域から飛来する塩分は、コンクリート構造物表面に 到達し、長期間かけてコンクリート中に浸透することに より、塩害を引き起こす。コンクリート標準示方書^{1)で} は、コンクリート中の浸透解析の境界条件となる表面塩 分量を海岸の距離に応じた方法で定めている。2013年改 正版では、飛来塩分捕集箱(土研式捕集器)のような信頼 性が高い飛来塩分量が得られている場合には経験的な式 を用いて、表面塩分量を推定する方法が追加されている。

しかしながら,飛来塩分は,海域の波から発生し,風 によって大気中に輸送され,構造物に到達・浸透する。 そのため,海岸からの距離が同様の場所でも,海域及び 陸域の地形の影響を受け,表面塩分量が異なる場合があ る。例えば,山田ら²⁾の研究では,海域の波動場の状況 によって海岸に輸送される飛来塩分量が異なることが報 告されている。佐伯ら³⁾は,同一構造物の周辺であって も,飛来塩分捕集箱の位置が少し離れただけで局所的な 周辺地形等の環境条件の影響を受けて塩分量が大きく違 うことを指摘している。さらに,実構造物の劣化状況に おいて,同一構造物の各部位によって劣化状況が異なる ことを報告している。岩崎²⁾らは,現地観測及び数値解 析において構造物の各部位周辺を輸送する塩分量は異な ることを報告している。

そのため、コンクリート構造物各部位及びその周辺の 飛来塩分を高精度で予測するには、海岸からの距離や観 測結果に加え、その周辺の地形及び海岸の状況、構造物 の形状を考慮できる飛来塩分の予測手法を用いることが 重要となる。既往研究において、仲座ら⁴⁾、田中ら⁵⁾、 岩崎ら⁶は、風環境と飛来塩分の数値シミュレーション を組み合わせた手法で、構造物の形状とその周辺の風況 を考慮した飛来塩分の予測計算を実施し、精度良く再現 できることを報告している。山田ら⁷⁰は、波動現象及び 風環境,飛来塩分の発生・輸送過程を組み合わせた数値 シミュレーションを構築し、その周辺の地形及び風況、 波浪,構造物の形状を考慮した再現計算を実施している。

これらの研究により,海域から構造物各部位へ到達す る飛来塩分を高精度で再現・予測できるようになりつつ ある。その一方で,このような方法では計算負荷が非常 に大きいことから,現地で時系列的に変化する風況及び 波浪条件を詳細かつ長期的に考慮した再現・予測計算を 実施することは困難である。

本研究では、数値シミュレーションを援用した橋桁各 部位の飛来塩分の再現・予測手法を提案し、数時間単位 の風況及び波浪条件を用いて5年間の橋桁各部位に到達 する塩分量の再現計算を行った。さらに、長期的に同一 地点で飛来塩分及び風況条件を観測したデータは貴重で あることから5年間実施した現地観測結果を整理し、そ こに波浪条件を加え、それらの関係について検討した。

2. 対象とした橋桁

研究の対象とした橋桁は、新潟県上越地方の名立川の 河口部に設置されている図-1の名立大橋とした。この 場所は、夏季では波浪条件が穏やかであるが、冬季では 季節風により気象及び波浪が激しく、海域から飛来塩分 が大量に輸送されるような特徴がある。名立大橋の橋桁 は海岸の汀線位置に設置されており、冬季の高波浪時に は海域から来襲した波が橋桁下部付近まで到達するよう な条件となる。

*1 明石工業高等専門学校 都市システム工学科助教 博(工) (正会員)

*2 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系教授 博(工) (正会員)

*3 明石工業高等専門学校 技術教育支援センター技術職員 修(工) (正会員)

*4 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系教授 博(工)



図-1 名立大橋(新潟県上越地方)



図-2 風速の観測結果(2002~2006年)

3. 名立大橋周辺の飛来塩分と風況・波浪条件

3.1 データの収集期間

2002 年 3 月~2006 年 12 月の約 5 年間の飛来塩分及び 風況,波浪のデータを収集した。

3.2 風況(風速・風向)条件の整理

(1) 現地観測の方法

観測は、橋桁から沿岸方向に 50m 程度南側に設置され ている気象ステーションを用いて実施した。風速・風向 は高さ 6m の位置で測定しており、1 時間間隔の瞬間値 データを使用した。ただし、2004 年以外では 5 月~10 月の観測結果を取得できなかったため、その期間と欠測 の部分については、気象庁の新潟県大潟観測所の観測デ ータを橋桁周辺の値に換算して使用した。換算方法は、 橋桁周辺と気象庁大潟観測所の観測結果から、式(1)のよ うな比例係数を用いるものとした。

$$u = \beta \cdot u_k \tag{1}$$

ここで、u は名立大橋周辺の現地観測位置に換算した風速(m/s), u_k は気象庁大潟観測点で測定された風速(m/s), β は比例係数で現地観測結果の関係から 1.476 とした。 風向は、両者の観測結果に大きな違いがなかったため、 換算せずに 16 方位に区分した風向で整理した。

(2) 現地観測結果の整理

5 年間の風速の観測結果を整理したものを図-2 に示 す。図の値は、1 ヶ月間の平均風速を整理したものであ



図-3 風向の観測結果(冬季)



図-4 名立大橋沖海域の波高分布

る。図に示すように、冬季で風速が大きく、それ以外の 5月~10月の季節で風速が小さくなっている。図-3は5 年間の11月から翌年4月までの冬季の風向を整理した結 果である。図の値は、風速5m/s以上のデータを対象にし ている。図から分かるように、風速が大きくなる冬季で は、北西~西方向の風向が最も頻度が多くなる傾向が見 られた。この結果から、名立大橋周辺では冬季の季節風 により、海域側から強い風が作用していることがわかる。 3.3 波浪条件の整理

(1) 現地観測結果の取得

波浪は,名立川河口部周辺で観測された例がないため, 全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)の新潟県直江津観 測点の観測結果を取得した。ただし,直江津港観測点は, 名立大橋から 20km 程度離れており,名立大橋周辺の波 浪条件と直江津港観測点の波浪条件が異なる可能性があ る。そのため,海岸工学の分野で使用されているエネル ギー平衡方程式モデル⁸⁾を用いて,広域の波浪計算を行 い,両者の波浪条件の関係について確認を行った。

(2) 名立大橋沖海域と直江津港観測点の波浪の関係

図-4 は、飛来塩分が大量に発生すると想定される高 波浪時の波高分布の計算結果である。計算結果では、直 江津港観測点と名立大橋沖海域では、波高が大きく変化 していないことがわかる。図-5 は、直江津港観測点で 観測された波高と計算による名立大橋沖海域での波高を 比較したものである。図に示すように、名立大橋沖海域 に来襲する波高は、直江津港観測点で観測された波高と



ほぼ同様の値であり,波の周期についても同様の傾向が 見られた。この結果から,名立大橋周辺に来襲する波浪 は,直江津港観測点で観測された波浪条件とほとんど差 がないことが確認できた。

(3) 観測結果の整理

直江津港観測点で観測された波高の値を整理したもの を図-6に示す。図に示すように、来襲する波の波高は、 11月から翌年4月頃まで大きくなっており、年別で整理 した場合、1月及び2月が最も波高が大きくなる傾向が 見られる。また、冬季以外の5~10月では、波高が1.0m 以下となっており、季節によって波高に大きな差が見ら れる。

3.4 現地観測による飛来塩分

(1) 現地観測の方法

飛来塩分の現地観測は, 飛来塩分捕集箱を橋桁の海側 に設置し,海域から飛来する塩分を採取した。飛来塩分 の採取方法は土研式であり,捕集板に到達した飛来塩分 をポリタンク中に集める方法である。飛来塩分捕集箱の 捕集板は,橋桁側面の角度に垂直となるように北から 295度の角度とした。1回の観測期間は,約1ヶ月間であ る。採取した塩分量の分析は,ポリタンク中の水溶液の Cl濃度を塩化物イオンメータで測定した。その後,暴露 時間及び捕集箱の捕集板の面積をもとに単位時間・単位 面積当たりの飛来塩分量(mdd)に換算した。

(2) 観測結果の整理

2002 年 3 月~2006 年 12 月までの観測結果を整理した ものを図-7 に示す。図に示すように、飛来塩分は冬季 に大きく、夏季に小さくなる傾向がある。各年 1 月の観 測結果は大きくばらついており、これは、各年 1 月の風 速及び波高の観測結果に大きな差がなかったことから、 塩分捕集箱の捕集口に雪が着雪することにより、塩分量 が採取できなかったためであると考えられる。この地域 は、一般に 12 月から翌年 2 月までの期間に降雪があり、 名立大橋周辺で気象庁が公開しているデータにおいても、



1月が年間の降雪量の最大となる傾向が見られた。一方, 2002年11月と2006年4月の観測結果は,前後の月と比較して,局所的に飛来塩分量が大きくなっており,これは風速及び波高の観測結果の値が大きくなっているためである。

また、5年間の飛来塩分量の現地観測結果は、局所的 に若干のばらつきはあるが、毎年の飛来塩分の変動傾向 に大きな差が見られないことがわかる。これは、佐伯ら ³⁾が実施した現地観測結果の傾向と同様である。

3.5 飛来塩分と風速・波高の関係

図-8 は, 飛来塩分と風速の関係を整理したものであ る。図の風速は, 飛来塩分捕集箱の捕集板と垂直となる 方向を θ として, 風速に cos θ を掛けて補正し, それを 1 回の観測期間でそれぞれ平均したものである。図に示す ように, 図の値は指数的に点が分布しているとともに, 飛来塩分量と風速に相関があることが分かる。ただし, 風速 7.0m/s 付近で大きく外れているデータが見られるが, これは 2004 年及び 2006 年の 1 月に観測されたデータで あり, 捕集箱の捕集板への雪の着雪の影響により飛来塩 分量が小さくなったことが影響していると考えられる。 また, 全体的なデータのばらつきは, 飛来塩分が風速だ けでなく, 波浪条件にも影響を受けているためであると 考えられる。

海岸近傍での飛来塩分は,波浪現象によって海水面が 乱れ,そこから発生した飛沫に大きく影響を受けること



が知られている。図-9 は, 飛来塩分と波高の関係を整 理した結果である。図より, 風速の場合と同様に, 飛来 塩分と波高の関係は指数的な分布を示しており, 塩分量 は波高にも影響を受けているといえる。

風速と波高の両方の影響を飛来塩分量に変換し,現地 観測の飛来塩分量と比較を行った。風速と波高の飛来塩 分量への変換は,両者を変数とした式(2)で計算した。

$$c_b = \alpha \cdot u^p \cdot H^q_w \tag{2}$$

ここで, c_b は飛来塩分の観測結果(mdd), u は現地観測に よる風速, H_w は名立大橋沖海域での波高である。比例係 数 α は現地観測結果を再現できるように 13.5 を与えた。 係数 p, q は, 現地の地形や海岸の状況によって異なる値 であり, 今回の計算では 1.0 と仮定した。

図-10は、風速及び波高の影響を飛来塩分量に変換した値と飛来塩分の観測結果を整理したものである。図に示すように、風速及び波高を飛来塩分に換算した結果は、現地観測結果を良く再現できており、風況と波浪の両方の条件を考慮することで、観測による飛来塩分量を精度よく再現できることがわかる。



図-11 再現計算の全体の構成

4. 構造物各部位の飛来塩分の再現計算

4.1 計算全体の構成

計算全体の構成を図-11に示す。図に示すように、数 値シミュレーションから飛来塩分の算定図を作成し、そ こから飛来塩分量を計算する手法について検討を行った。 まず、飛来塩分の算定図を作成するための風環境及び飛 来塩分の数値シミュレーションを実施する。数値シミュ レーションの入力条件は、橋桁周辺の地形及び風速、波 高である。算定図は、数値シミュレーションの結果を用 いて、風速・波高と飛来塩分の関係を整理して作成した。 また、算定図は橋桁各部位でそれぞれ作成し、現地観測 を行っている地点の風速及び波高と橋桁各部位の塩分量 の関係を算定図として整理した。最後に、作成された算 定図を用いて、現地観測で得られた風速及び波浪条件を 入力し、飛来塩分の再現計算を行った。

4.2 計算方法

数値シミュレーションモデルは、山田ら⁷⁰を参考にN-S 方程式を用いた風環境モデルと移流拡散方程式を用いた モデルを組み合わせたものである。ただし、本計算では、 山田ら⁷⁰のように飛来塩分の発生を波動モデルの計算か ら求める方法ではなく、名立大橋の沖側での波高の大き さに比例する方法で、飛来塩分の発生量の計算を行った。



図-12 計算地形



図-13 数値シミュレーションの計算結果

計算モデルは,過去の観測データから風速と波浪が2時間程度で大きく変化することがないことがわかっているため定常モデルとした。飛来塩分の発生位置は,汀線近傍の砕波帯から沖側までの海域全体で設定した。計算モデルにおける海域での飛来塩分の発生量は式(3)とした。

$$c(z) = c_0 \cdot \exp(-w_s / v_t \cdot z)$$
(3)
$$c_0 = \frac{-(w_s / v_t) \cdot a_w}{\exp\{-(w_s / v_t) \cdot nz\} - 1.0} \cdot H_w$$

ここで、c(z)は飛来塩分濃度の鉛直分布(mg/m³)、 c_0 は海 水面上で発生する飛来塩分濃度(mg/m³)、 H_w は波高(m)、 zは鉛直高さ(m)、nzは鉛直方向の計算領域の高さ(m)で ある。 w_s は飛来塩分粒子の沈降速度(m/s)であり、仲座ら ⁴⁾の結果を参考に $w_s=0.006$ とした。 a_w は比例係数であり、 海底地形や消波ブロックなどの有無による海岸の状況に よって値が異なる係数であり、現段階ではこの係数は定 量化できていないため、観測結果を用いて 8.9 を設定し た。 v_t は渦動粘性係数(m²/s)であり、 $k-\varepsilon$ 乱流モデルに よって計算領域全体を計算し、その結果を設定した。



4.3 計算条件及びケース

計算地形は,名立大橋周辺の岸沖方向140m×沿岸方向200m×鉛直方向50mの図-12のような空間で計算を 実施した。計算格子間隔は沿岸方向及び岸沖方向が1m であり,鉛直方向が0.5mである。風の場の境界条件は, 岸側と沖側境界を透過境界とし,沿岸方向の境界は不透 過境界とした。境界に設定する風速の鉛直分布は,中村 ら9を参考に指数分布で設定した。

算定図作成のための計算は36ケースを実施した。計算 に設定した風速は2,5,10,15,20,25m/s,波高は各 風速に対して,1,2,3,4,6,8mを設定した。

4.4 計算結果及び考察

(1) 飛来塩分の算定図

図-13 は数値シミュレーションによる名立大橋周辺 の飛来塩分量の断面的な分布を可視化した結果である。 橋桁各部位周辺の飛来塩分量が計算できていることがわ かる。このような橋桁周辺の地形まで含めた計算結果か ら算定図を作成した。図-14 は,飛来塩分捕集箱の設置 位置における飛来塩分の算定図を作成した結果である。 波高を一定の条件として,風速を変化させた計算を行っ た結果では,飛来塩分と風速がほぼ直線で近似できる結 果となったため,直線近似することで算定図を作成した。

(2) 算定図を用いた橋桁各部位の飛来塩分量の再現

2002 年 4 月~2006 年 12 月までの 2 時間間隔の風速及 び波高の観測結果を飛来塩分の算定図に入力し,2 時間 間隔の飛来塩分量の算定を行った。観測結果の風の場は, 風向が変化するため,橋桁及び飛来塩分捕集箱の捕集板 と垂直となる 295 度を基準として式(4)のように補正して 与えた。

$$u_{-} = u \cdot \cos \theta \qquad (-90 \le \theta \le 90) \tag{4}$$

ここで、ucは計算に設定した風速(m/s)、uは観測された



風速(m/s), θは基準角度 295 度からの角度(度)である。

図-15は、その結果を飛来塩分の現地観測と同様の期間で平均し、観測結果と比較したものである。図に示すように、計算結果は、若干のばらつきが見られるが観測結果を良く再現できていることがわかる。この結果から、橋桁各部位においても同様の方法で飛来塩分を再現できると考えられる。

図-16は、算定図を用いて、橋桁海側と橋桁下部の飛 来塩分量を計算した結果である。図の現地観測結果は、 中村ら⁹が行った橋桁海側の観測結果である。図より、 橋桁海側の計算結果は、現地観測の全体的な傾向は再現 できている。ただし、現地観測結果で見られる4月と11 月で塩分量が局所的に大きくなっている部分は、計算結 果では再現できていない。一般的に、日本海沿岸に位置 する新潟県では、11月と4月は冬季の12月〜翌年3月 までの期間より塩分量が小さくなる傾向がある。しかし ながら、現地観測結果は、11月と4月の塩分量が非常に 大きくなっており、観測結果に問題があると考えられる。

5. 結論

5 年間の長期的な現地観測結果を整理するとともに, 名立大橋の橋桁各部位に到達する飛来塩分の再現手法に ついて検討を行った。その結果,5 年間の観測結果から 毎年の飛来塩分の変動傾向は大きく差がないこと, 飛来 塩分は風況及び波浪条件に大きく影響を受けて変化して いることが示された。さらに, 飛来塩分の数値シミュレ ーションの結果から作成された飛来塩分の算定図を用い ることで, 飛来塩分の観測結果及び橋桁各部位の飛来塩 分を再現できることが示された。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費「コンクリート構 造物の高精度な長期供用性予測に資する環境作用評価シ ステムの開発」(研究代表者:下村 匠,課題番号: 25289131)及び(研究代表者:中村 文則,課題番号: 26870810)の一環として行ったものである。また、国土交 通省北陸地方整備局高田河川国道事務所から現地観測の 貴重なデータの提供を頂いた。記して謝意を表します。

参考文献

- 土木学会:2013 年制定コンクリート標準示方書[維 持管理編], pp.172-173, 2013
- 山田文則,細山田得三:海面から発生する飛来塩分 に関する実地観測とその飛来塩分発生・輸送数値モ デルの開発,海岸工学論文集,第 50 巻, No.2, pp.1176-1180, 2003.11
- 佐伯竜彦,竹田光明,佐々木謙二,嶋 毅:飛来塩 分環境の定量評価に関する研究,土木学会論文集 E, Vol.66.No.1, 1-20, 2010.1
- 4) 仲座栄三,津嘉山正光,山路功祐,日野幹雄:飛沫 海塩粒子)拡散の数値流体力学的解析,海岸工学論文 集,第40巻, No.2, pp.1036-1040, 1993.11
- 5) 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, 2004.11
- 岩崎英治, 鹿毛 勇, 加藤真志, 中西克佳, 丹羽秀 聡: 耐候性鋼橋梁の断面部位別の腐食特性とその評 価に関する一考察, 土木学会論文集 A, Vol.66.No.2, 297-311, 2010.6
- 7) 山田文則,下村 匠,細山田得三:飛来塩分の発生・ 輸送シミュレータの開発,コンクリート工学年次論 文集, Vol.27, No.1, pp.865-870, 2005.6
- 2) 土木学会:海岸波動(波・構造物・地盤の相互作用の 解析法), pp.20-26, 1994.7
- 9) 中村文則,生田麻美,下村 匠,細山田得三:飛来 塩分が到達するコンクリートの表面塩分量に関す る現地観測と数値解析,コンクリート工学年次論文 集, Vol.36, No.1, pp.880-885, 2014.7