新潟県沿岸全域を対象とした飛来塩分の 定量評価技術の開発に関する事業

中村 文則1・下村 匠2

¹長岡技術科学大学助教 工学研究科環境社会基盤工学専攻 ²長岡技術科学大学教授 工学研究科環境社会基盤工学専攻

新潟県では、冬季の季節風の作用により、海域から飛来塩分が大量に発生するため、建設構造物の塩害が問題となっている。それを解決するためには、建設構造物に作用する飛来塩分量(表面塩分量)を正確に 予測することが重要である。本申請事業では、新潟県の沿岸全域において、気象・波浪・地形を考慮した 飛来塩分量(表面塩分量)の定量的な評価方法の検討を行った。さらに、その結果を利用して塩分量の平面 分布図(マップ)の作成を行った。その結果、新潟県沿岸部の気象・波浪条件および地形条件を考慮して、 個別の構造物に作用する塩分量を定量的に予測できる算定式を確立することができた。さらに、新潟県沿 岸部における飛来塩分量(表面塩分量)の平面的な分布を示すことができた。

キーワード: 塩害,飛来塩分,沿岸環境,コンクリート構造物

1. はじめに

北陸地方に位置する新潟県では、冬季の季節風の作用 により、海域から飛来塩分が大量に発生し、構造物の長 期的な耐力を低下させるため問題となっている. 飛来塩 分は、風や波浪の作用によって海域から発生し、風によ り輸送され、構造物表面に到達する. その後、長時間か けてコンクリート内部に浸透し、鉄筋を腐食させる. そ のため、コンクリート構造物の塩害劣化を軽減させるた めには、その境界条件となる構造物外部からの飛来塩分 量を正確に予測することが重要である.

既往研究では、新潟県を含めた橋梁を対象とした飛来 塩分の全国調査⁰が実施されており、その結果が報告さ れている. コンクリート標準示方書⁹では、構造物に作 用する飛来塩分量(表面塩化物イオン量)を算定する方法 として、海岸からの距離や高さによる予測方法が記載さ れており、一般的に幅広く利用されている. これらの成 果により、離岸距離から飛来塩分を簡易的に予測できる ようになっている.

その一方で, 飛来塩分が, 構造物周辺の地形や離岸距離だけでなく, 気象・波浪にも影響を受けて変化することが報告されている.著者ら³1は, 同様の離岸距離でも周辺の気象・波浪条件の違いにより, 飛来塩分量に大きく差が生じることを報告している.構造物周辺の地形条件や離岸距離に加えて, 気象・波浪条件の影響を考慮し

て構造物に作用する飛来塩分量を予測することができれば、構造物に作用する塩分量の予測精度の向上につながる.

本申請事業では、新潟県の沿岸全域において、現地観 測と数値シミュレーションの結果から、気象・波浪・地 形を考慮した飛来塩分(表面塩分)の定量的な評価方法の 検討を行った.さらに、その方法を利用して飛来塩分量 (表面塩分量)の平面分布図(マップ)の作成を行った.

2. 新潟県沿岸部の気象・波浪条件の定量化

構造物に作用する飛来塩分量(表面塩分量)を評価する ためには、気象・波浪条件の影響を定量化することが有 効である.そのため、新潟県沿岸部において、冬季の気 象・波浪条件の定量化を行った.

(1) 観測結果を利用する方法とその問題点

気象・波浪条件は、気象庁や国土交通省によって現地 観測が実施されており、その結果が一般に公開されてい る.例えば、気象データは、気象庁が公開しているアメ ダスの観測結果があり、風速・風向や降雨量などの観測 結果が時系列で公開されている.波浪データは、国土交 通省港湾局によって全国の沿岸部に全国港湾海洋波浪情 報網(NOWPHAS)の観測点が配置されており、その観測 結果が過去を含めて20分~2時間間隔で公開されている.



図-1 領域気象モデルの計算領域



図-2 新潟県周辺の風速分布

これらを利用して,構造物周辺に作用する気象・波浪条件を詳細に把握することが可能である.

しかしながら、新潟県は沿岸線の距離が長く、沿岸部 に多数の構造物が設置されているといった特徴がある. そのため、気象庁や国土交通省の観測点だけでは、すべ ての構造物に作用する気象・波浪条件を正確に予測する ことは困難である.沿岸部に設置されている個別の構造 物に作用する気象・波浪条件を正確に把握するためには、 構造物周辺に観測点の配置が少ない場所にも対応できる 方法を確立する必要がある.

(2) 新潟県沿岸部の気象条件の定量化

a) 気象条件の予測方法

新潟県沿岸部の全域に作用する気象条件を予測するために、気象学・海岸工学分野で利用されている数値シミュレーションモデルを利用する方法について検討を行った.気象条件(風速・風向)の予測は、領域気象モデル Advance Research WRF(WRF-ARW, ver. 3.6.1)⁴を利用した.



図-3 風向頻度の計算結果と観測結果

このモデルは、米国気象センター(NCAR)やペンシルバ ニア州立大学などの組織が共同開発し、オープンソース として公開しているものである.地形や境界における風 況、気圧などを設定することで、風況、気圧、温度など の平面的な分布を時系列で計算することが可能である.

b) 計算条件および境界条件

計算領域は、図-1のような新潟県を中心とした東西方 向 567km,北南方向 567kmの範囲である.計算領域のネ スティングは 2 段階であり,格子間隔は第 1 領域目が 3km,第 2 領域目が 1km である.第 2 領域目は,新潟県 を中心とした東西方向 189km,北南方向 189kmの範囲で ある.鉛直方向の層数は 32 層である.計算に設定した 地形データは,米国地質調査所(United State Geological Survey, USGS)の 30 秒メッシュ(約 1km)である.大気データ は,米国環境予測データ(National Center for Environmental Prediction, NCEP)の客観解析データ(Global Final Analysis)を 用いた.このデータは,水平方向に 1 度メッシュの 6 時 間間隔の風速分布が収納されている.

計算期間は,新潟県内において飛来塩分量が大きくなる冬季の2016年12月1日0:00~2017年4月10日24:00とした.計算時間間隔は1時間間隔である.

c) 新潟県沿岸部の気象条件の計算結果

図-2 は、新潟県周辺の風速分布を示した結果である. 図の分布は、地表面から高さ10mの位置の値を整理した 結果である.図に示すように、新潟県沿岸部に作用する 風は、西〜北西の方向であり、平均風速 3~6m/s の場所 が多くなっている.佐渡島の風下側(東側)では、風速が 減少している傾向が見られる.

図の白丸印は、気象庁の観測点の位置を示した結果で あり、領域気象モデルの計算結果の妥当性の検証のため に、計算結果と気象庁のアメダスの観測結果の比較を行



った. 観測点(気象庁)の位置における風向頻度の計算結 果と観測結果を比較した結果を図-3に示す. 図に示すよ うに,風向の計算結果は、気象庁の観測結果をおおむね 再現できていることがわかる. 佐渡島の西側に位置する 相川観測点では,北西~西の範囲で風向の頻度が高く, 冬季の日本海沿岸部の気象条件を計算で再現できている と考えられる. 大潟観測点では,西方向の風向の頻度が 若干過小となっているが,風向の頻度の傾向は再現でき ている.

図4は、1時間間隔の風速の時系列分布を示したものである.計算で出力される風速は、瞬間的な値であるため、気象庁の観測結果のような平均化した値に変換を行った.一般的に、風速の瞬間値と平均値では、0.67~0.77倍程度の差があるため、計算された風速を0.67倍で変換を行った.また、風速の観測結果は、測定を実施した高さで値が変化するため、地表面から10mの高さに統一して評価することとした.高さによる風速の補正は式(1)のようなべき乗則で行った.

$$U_{K} = U_{p} \left(\frac{z_{K}}{z_{p}}\right)^{\alpha_{w}} \tag{1}$$

ここで、 U_k は高さ10m位置の風速(m/s)、 U_b は風速計が設置されている高さの風速(m/s)、 z_b は風速計が設置されている高さ(m)、 z_k は基準となる風速の高さ(=10.0)(m)、 a_k は係数であり、建築荷重指針・同解説を参考に a_k =0.2とした.



図に示すように、佐渡島西側の相川観測点と大潟観測 点では、計算結果の風速が観測結果の変動を再現できて いることがわかる.他の観測点においては、計算結果の 風速が若干過小になる点も見られたが、変動傾向はおお むね再現できていた.これらの結果から、領域気象モデ ルを用いて、風速・風向を再現できることがわかった.

d) 新潟県沿岸部の気象条件の定量化

新潟県沿岸部における風速を沿岸線 0~1.5km 間隔で 摘出した結果を図-5 に示す.図の風速は、汀線付近の 海上で摘出した風速を平均した値である.図より、計算 結果は、風速 3~6m/s 程度の範囲に分布しており、沿岸 部で大きな差がないことがわかる.沿岸線距離 100~ 150km の区間では、風速が若干大きくなっており、 5.4m/s 程度であった.今回の結果は、2016年12月~2017 年3月の期間を対象したものであるため、今後、数年分 の風速の計算結果から気象条件の定量化を行う予定であ る.

(3) 新潟県沿岸部の波浪条件の定量化

a) 波浪条件の予測方法

波浪条件は、気象条件の予測計算と同様に、数値シミ ュレーションモデルを用いて予測を行った.計算モデル は、デルフト工学大学で開発された波浪推算モデル SWAN(Simulating WAves Nearshore)⁵の ver.40.21A を利用し た.このモデルは、既往研究⁶において日本海沿岸部の 波浪予測を対象とした解析事例が報告されており、適切 に計算条件を設定することで、実海域の波浪条件を予測 できることが報告されている.波浪計算の基礎方程式は 波作用平衡式であり、風による波の発達、減衰、非線形 干渉の物理過程を含めた予測が可能である.なお、マニ



図-6 波浪推算モデルの計算領域

ュアルおよび実行ファイル(exe形式)が公開されており, 計算モデルのコマンドファイルに計算の設定値を保存し, 海域の地形データ,海上の風速データを入力すれば,計 算が実行できるようになっている.

b) 計算条件および境界条件

計算領域は、図-6のようなx方向730km、y方向668kmの 新潟県沿岸部を中心とした範囲である.計算格子数は、 x方向1460個、y方向1336個であり、計算格子間隔はxおよ びy方向で約0.5kmである.座標は直交座標系とした.水 深および地上の標高は、一般財団法人水路協会の30秒格 子間隔データJTOPO30(領域M1407)を用いた.計算に入 力する海上の風況データは、気象庁の気象予測データ GPV(MSM)を用いた.データの時間間隔は6時間であり、 平面的な空間解像度は約5kmである.波の発達モデルは、 Komenモデルを選択した.計算時間間隔は30分間隔とし た.計算期間は、気象条件の解析と同様に2016年12月1 日0:00~2017年4月10日24:00である.

c) 新潟県沿岸部の波浪条件の予測結果

図-7は、新潟県沿岸部の波高分布の計算結果を示した ものである.図の値は、期間内における波高の平均値を 示したものである.図に示すように、冬季の季節によっ て沖海域で波高が高くなっており、佐渡島の北西側で波 高2m程度となっている.佐渡島周辺の波高は、佐渡島 の背後(南東側)で低い傾向があり、南東側では波高1.0m 以下となっている.図の丸印は、全国港湾海洋波浪情報 網(NOWPHAS)の観測点であり、北側が新潟沖観測点、 南側が直江津港観測点である.計算結果の妥当性の検証 のために、計算と観測結果との比較を行った.

図-8は、波浪推算シミュレーションの計算結果と観測 結果を比較した結果である.図の値は、観測結果が2時 間間隔であり、計算結果が1時間間隔の波高である.図 に示すように、計算結果の波高は、観測結果の変動をお おむね再現できていることがわかる.図(a)の新潟沖観 測点では、瞬間的な波高の最大値が若干過小評価になっ



図-7 新潟県周辺の波高分布の計算結果



ているが,波高の変動傾向はよく再現できている.図 (b)の直江津港観測点の結果では,波高が過小な値となっている期間もあるが,時系列の変動傾向はよく一致している.この結果より,数値モデルの計算結果が,新潟 県沿岸部の波浪条件を再現できているといえる.

d) 新潟県沿岸部の波浪条件の定量化

図-9は、新潟県沿岸部における波高を摘出した結果である.波高の摘出は、水深35mの沿岸線距離が0.5~ 1.5km間隔で行った.図に示すように、波高は、新潟県の北側(村上市付近)で大きく、南側(糸魚川市付近)で小 さくなる傾向が見られる.これは、能登半島による波浪



図-9 新潟県周辺の波高分布の計算結果

の遮蔽効果が関係していると考えられる. 冬季の波浪は, 西〜北西方向から来襲するため,新潟県南側の一部が, 能登半島の波浪の遮蔽域に含まれ,波高が小さくなって いる.また,波高は,沿岸距離100~150kmの範囲で若干 小さくなっているが,佐渡島による波浪の遮蔽効果であ ると考えられる.

以上の結果より、数値シミュレーションを用いること で、新潟県沿岸部における気象・波浪条件を定量的に評 価できることが示された.

3. 沿岸部(海岸周辺)における地形条件の定量化

(1) 飛来塩分(表面塩分)に影響を与える地形条件

飛来塩分は、海域から発生し、風によって輸送される ため、海域と陸域の両方の地形の影響を受ける現象であ る.陸域の影響としては、防風林などの植栽や防風施設 が飛来塩分の輸送量に影響していることが知られている.

海域・海岸の地形条件は、海底地形や消波ブロックの 設置によって、飛来塩分の発生・輸送量が異なることが 報告されている.例えば、著者ら[¬]は、海底地形が飛来 塩分の発生・輸送量に影響を及ぼしていることを報告し ている.松永ら[®]は、消波工(消波ブロック)の背後で飛 来塩分の観測を行い、その結果を報告している.山田ら [®]および佐伯ら^{||}⁰は、海域に設置されている消波ブロッ クから飛来塩分が大量に発生していることを指摘してい る.ただし、消波ブロックや砂浜の形状などの違いを考 慮して、飛来塩分量を算定する方法は十分に確立できて いないのが現状である.海岸の地形条件の違いを定量的 に評価する方法を確立できれば、構造物に作用する飛来 塩分量への影響を定量化することが可能となる.

そこで、海岸地形条件を考慮して飛来塩分量(表面塩



図-10 地形条件の定量化(数値化)の方法

分量)を予測できるようにするために, 消波施設の設置 状況や砂浜形状などの海岸地形条件を定量的に評価する 方法について検討を行った.

(2) 地形条件(海岸周辺)の定量化

海岸周辺の地形条件の定量化は、一般的に公開されて いる空中写真を利用する方法について検討を行った.空 中写真は、国土地理院およびGoogleによって提供されて いるGoogle earthの空中写真を利用した.地形条件の定量 化(数値化)は、図-10のような空中写真上に基準点を設 定し、そこから消波施設の設置位置までの距離を測定し た.また、既往研究ⁿでは、表面塩分量が、砂浜の大き さ(砂浜幅)にも影響を受けていることが明らかにされて いるため、基準点から汀線までの砂浜の距離(砂浜幅)も 含めて測定することにした.

大気中の飛来塩分(表面塩分量)は、風向によって輸送 される方向が変化するため、基準点からの距離は、風向 に応じた方向で測定を行った.風向の分割は16方位であ る.実際の定量化は、1時間間隔で風向に応じた距離の 測定を行い、それを観測期間全体で平均する方法とした. このように空中写真から地形や風向を考慮して測定した 距離は、換算距離と定義することにした.

(3) 地形条件の定量化の測定例

図-11は、国土地理院が公開している空中写真を用いて、試行的に海岸の地形条件を測定した結果である.風向は北西方向とした.図に示すように、海岸地形は、沖海域に消波施設が設置されているような条件であり、砂浜幅(汀線から基準点までの距離)が76m、供試体の設置位置から消波施設の設置位置までの距離が222.2mである.この結果から、空中写真を利用して砂浜の大きさや消波施設の設置位置を定量的に評価できていることがわかる.



図-11 地形条件(換算距離)の測定例

気象・波浪・地形条件に応じた飛来塩分量(表 面塩分量)の定式化

気象・波浪・地形条件の影響を考慮して,構造物に 作用する飛来塩分量(表面塩分量)を定量化するために, 新潟県沿岸部で実施された現地観測の結果を整理した. さらに,その結果から飛来塩分量(表面塩分量)の算定式 を構築した.

(1) 飛来塩分(表面塩分)の現地観測

a) 観測場所および観測期間

観測期間は、2016年12月19日~2017年4月1日の103日間 である. 観測場所は、図-12に示す観測海岸1~9である. 観測海岸1~5は、新潟県北部に位置する海岸であり、沿 岸線の距離が20km程度である. 観測海岸6~9は、新潟 県中央部に位置する海岸であり、沿岸線の距離が22km 程度である.

観測点は、海岸の砂浜や消波施設(ブロック)の設置状況の異なる海岸に、数十m~数百m程度の間隔で配置した. 観測点の配置数は、観測海岸1~5に50点、観測海岸6~9に40点の合計90点である.

b) 観測方法および分析方法

表面塩分量の採取はモルタル供試体で行った.供試体 のモルタルの配合は、水セメント比50%であり、セメン トが普通ポルトランドセメント(密度3.16kg/cm³)、細骨材 が川砂(密度2.96g/cm³)である.供試体寸法は縦30mm、横 40mm、高さ5mmである.供試体は気中養生後、供試体 の暴露面以外を防水加工した.この方法で、採取される 塩分量は、降雨の洗い流し作用を含んだモルタル表層の 塩分量(塩化物イオン量)である.

供試体の暴露期間終了後は、現地から分析室まで運び、 モルタルを粉砕後、蒸留水に投入・攪拌し、その溶液の 塩分量(塩化物イオン量)の測定を行った.測定方法は JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方



図-12 現地観測場所



図-13 表面塩分量と地形条件の関係(観測海岸1~5)

法」に基づき試料の処理を行い、イオン電極により塩化 物イオン量の測定を行った.測定は各供試体で3回つづ 行い、その平均値を整理した.その後、単位体積当たり の塩分量(塩化物イオン量)(kg/m³)として整理した.

c) 観測結果

観測海岸1~5の観測点の地形条件の定量化(数値化)を 行い,塩分量の観測結果との関係について検討を行った. 図-13は、観測海岸1~5における地形条件と表面塩分量 の関係を整理した結果である.図の横軸は、供試体の設 置位置(基準点)から汀線または消波施設までの換算距離 である.換算距離の算定は、観測海岸1~5の北側に位置 する気象庁鼠ヶ関観測点の観測結果を利用して、1時間 単位の風向から行った.図中のプロットの種類は、丸印 が砂浜の地形条件、四角印が消波施設が沖側に設置され た条件、三角印が堤防前面(汀線)に消波施設が設置され た条件である.白色のプロットは、空中写真だけでは分 類が困難な観測点と特殊な地形条件(観測点No.3-1~3-3 のような漁港などの周辺の構造物が大きく影響している もの)である. 図に示すように、塩分量は2~14kg/m³程度の範囲に分 布しており、換算距離が同程度でも塩分量に差が見られ る.この結果から、塩分量は換算距離だけでなく、ほか の条件の影響を受けていることがわかる.図のプロット の種類(形・色)で分類した結果では、塩分量の差に傾向 がある.砂浜海岸に分類された観測結果(丸印)では、塩 分量が2~6kg/m³程度と少なく、汀線からの距離(砂浜の 幅)に応じて減少している.

四角印の沖側に消波施設が設置されている海岸では, 塩分量が8~12kg/m³程度となっており,砂浜海岸の2~3 倍程度である.観測点No.2-11では,塩分量が4kg/m³程度 と少なくなっているが,明確な理由はわかっていない. 四角印(白色)は,観測点No.3-1~3-3であり,特殊な地形 の海岸である.この点は,北西側に位置する漁港の堤防 が,波浪の一部を遮蔽しているため,塩分量が少ない結 果となっている.

三角印の堤防前面に消波施設が設置された条件では、 塩分量が砂浜海岸より大きい結果となっており、塩分量 5~8kg/m³と10~14kg/m³程度に分布している.塩分量が5 ~8kg/m³程度の観測点は、周辺の海域に岩礁が分布して おり、その影響で消波施設に到達する波が小さくなり、 塩分量が低下したと考えられる.それ以外の観測点の塩 分量は、砂浜海岸の2~3倍程度である.以上の結果から、 塩分量は、離岸距離だけでなく、消波施設の設置のよう な地形条件の違いに影響を受けていることが示された.

d) 地形条件(消波施設と換算距離)の影響評価

消波施設の設置と換算距離による影響を定量化するために,図-13に指数関数的な曲線の追記を行った.図の 実線は,砂浜海岸の観測結果を式(2)の指数関数で近似した結果である.

$$y = y_0 \cdot \alpha \cdot \exp(-\beta' \cdot x) \tag{2}$$

ここで、β'は距離による表面塩分量の減衰率(1/m)である. 係数αは、砂浜海岸を1.0とした消波施設の設置による塩 分量の増加率の係数である.式の各係数は、砂浜海岸の 観測結果(丸印・黒色)と一致するように調整を行った結 果であり、ywが5.0(kg/m³)、係数β'が0.007(1/m)であった.

図の実線は、係数a=1.0(砂浜海岸)を設定した結果であ り、砂浜海岸の地形条件の観測結果をおおむね近似でき ている.図の点線は、係数a=1.5~3.0に変化させた条件 の結果である.図に示すように、消波施設が設置された 地形条件の観測結果は、係数a=2.0~3.0の範囲に分布し ていることがわかる.これは、消波施設の設置によって、 塩分量が2~3倍程度増加していることを意味している. この結果から、消波施設による表面塩分の増加率の係数 aと距離による減少率βを用いることで、表面塩分量に 与える地形条件の影響を定量的に評価できることがわか る.

(2) 飛来塩分(表面塩分量)の定式化

a) 塩分量の予測モデルの構築

現地観測から得られた海岸の地形条件と表面塩分量の 関係から、表面塩分量の予測モデルの構築を行った. 観 測結果で得られた表面塩分量が,海域からの距離と鉛直 高さに応じて減少していると仮定すれば,構造物の表面 塩分量は算定式(3)のように示すことができる.

$$C_0 = C_g \cdot \exp\{-(\beta/u) \cdot x\} \cdot \exp(-kz)$$
(3)

ここで、Gdは表面塩分量(kg/m³)、βは水平距離に応じた 塩分量の減衰係数(s/m²)、ult海域からの風速(m/s)、xは消 波施設の設置位置または汀線位置から供試体までの換算 距離(m)である、kは鉛直方向の塩分量の減衰係数(1/m)、 zは鉛直高さ(m)である、塩分発生量Cgは、気象・波浪・ 地形条件を考慮した海域上における仮想的な塩分発生量 (kg/m³)である、この値は、表面塩分量と同様のコンクリ ート中に含まれる塩分量を示した物理量(kg/m³)であり、 実際の大気中の飛来塩分量(mg/m²h)や塩分濃度(kg/m³)と は異なる量である。

塩分発生量C_eの算定は、既往研究を参考に算定式を構築して求めることにした. 宇多ら¹¹⁾の既往研究では、海域からの塩分の発生量をウェーバー則に基づいて式(4)でモデル化している.

$$\phi = b \cdot u^2 \tag{4}$$

ここで、**Φ**は塩分の発生量、*b*は海岸地形や波浪条件に 関係する係数、*u*は風速である.村上¹⁰らの研究では、 風速と波の波速から求めた相対風速をウェーバー則に適 用し、大気中の塩分量の観測結果をよく近似できること を報告している.

これらの結果から、海域からの塩分発生量Cgの算定式 として、風速のウェーバー則を基本としたモデルに、波 高を導入した簡易的な式(5)を構築した.

$$C_g = C_s \cdot \alpha \cdot \frac{1}{u_0^2} \left\{ \lambda \cdot u^2 + (1 - \lambda) (\sigma_w \cdot H_w)^2 \right\}$$
(5)

ここで、Cは観測結果から求めた換算塩分量(kg/m³)、uのは基準となる風速(m/s)、uは風速(m/s)、 σ_w は風速と波高に関する係数(1/s)、 H_w は沖海域の波高(m)である、係数λは、計算に考慮する風速と波高の重み付け係数($0 \le \lambda \le 1$)であり、1.0のときに風速のウェーバー則、0.0の時に波高だけを考慮した計算となる.

b) 予測モデルの各係数の設定

算定式の各係数は、観測海岸1~5の砂浜海岸における 観測結果から定めることにした.水平距離に応じた塩分 量の減衰係数βは、式(2)の距離による減衰係数β(=βu)と 観測時の風速uから算定した.減衰係数βは表面塩分量 の観測結果から0.007が得られている.観測時の風速uは、

表-1 表面塩分の予測モデルの設定パラメータ

項目		設定値
換算塩分量(kg/m ³)	C_s	8.5 ($\lambda = 1.0$) 9.4 ($\lambda = 0.5$) 10.5 ($\lambda = 0.0$)
消波施設による塩分増加率	α	砂浜 1.0 消波施設 2.5
風速・波高の重み付け係数	λ	0.0~1.0
波高の換算係数(1/s)	σ_w	2.35
基準となる風速(m/s)	<i>u</i> ₀	5.4
距離による塩分減衰率(s/m ²)	β	0.038



図-14 算定方法の概略図

気象庁鼠ヶ関観測点の1時間間隔のデータを収集して求 めた結果から、海域方向からの平均風速を5.4m/sとすれ ば、算定式中の減衰係数βは0.038s/m²となる.鉛直方向 の表面塩分量の減少係数kは、鉛直方向に塩分量が変化 しないと仮定して0.0(1/m)を設定した.

換算塩分量C₆は、観測海岸1~5の表面塩分量の観測結 果と一致するように値を設定した.ただし、表面塩分量 の観測結果は、使用した供試体のコンクリートの配合、 表面形状・凹凸、表面の含水状況に影響を受けて変化す る値である.さらに、供試体を設置した構造物の形状と 表面位置にも影響を受けるものである.そのため、これ らの条件が本検討と大きく異なる場合には、既往研究の 知見および現地観測を実施した結果から、換算塩分量C。 や減衰係数βを補正する必要がある.

基準風速uoは、現地観測時の海域からの平均風速 5.4m/sとした.係数ないは、観測海岸1~5の近傍に配置さ れているNOWPHASの新潟沖波浪観測点と気象庁の鼠ヶ 関観測点の観測結果を整理することでな=2.35とした.海 岸の地形条件による塩分発生量の増加率aは、砂浜海岸 の条件で1.0であり、消波施設が設置されている条件で はa=2.0~3.0であることから、計算ではa=2.5とした.以 上より算定式に設定した各パラメータを表-1に整理した.

実際の海岸では、図-14のように海域上に消波施設が 設置されている条件(離岸堤)の場合が多く見られる.こ のような場合では、海域上の施設位置と汀線位置の両方 から塩分が発生するため、その両方を計算し、それを統



合する必要がある.観測結果においても,塩分量の発生 が海域上の消波施設と汀線位置の両方で生じている傾向 が見られた.既往研究¹³の実験結果によれば,沖側に設 置されている消波施設を通過する波の波高は,0.1倍程 度(波の透過率=0.1)となることが報告されている.この 結果から,沖海域から来襲した波高を1.0とした場合に, 海域上(沖側)に設置された消波施設に作用する波高が0.9, その背後の砂浜位置に作用する波高が0.1となるように 分配することにした.風速の値のみを用いて塩分発生量 を計算する場合(λ =1.0)では,沖側の消波施設位置で風 速uを0.9倍,その背後の汀線位置で風速を0.1倍に分配し た.波の透過率については,消波施設の高さや幅に影響 を受けるが,今回の検討ではすべての消波施設の高さが 十分であるとして計算を行った.

c) 表面塩分量の計算結果および考察

図-15は、表面塩分量の計算結果と観測結果の関係を 示した結果である.図の計算結果は、風速と波高の重み 付け係数λを0.5(波高と風向を考慮して計算)としたもの である.図に示すように、計算結果と観測結果は、若干 差が見られるが、同様の傾向を示していることがわかる. 図の観測海岸6~9の表面塩分量は、計算結果のほうが観 測結果より全体的に大きい傾向が示された.これは、観 測海岸7で他の海岸と構造の異なる消波施設が設置され ており、そのような施設の構造の違いを計算で再現でき ていないためであると考えられる.消波施設の構造(種 類)の違いが及ぼす影響については今後の課題とした.

図-16は、観測海岸1~5の各観測点における表面塩分量の結果である.図に示すように、計算結果の表面塩分量は、各観測点の観測結果の変動をおおむね再現できていることがわかる.観測点No.1-3と2-16では、表面塩分量は、観測結果のほうが計算結果より大きく示されている.これは、砂浜の侵食が進んでおり、堤防付近まで波が来襲しているためである.空中写真による地形の判定では、砂浜の侵食のような急激な地形変化に対応できな



図-16 表面塩分量の計算結果の観測結果の比較

いため、このような差が生じたと考えられる.

観測点No.2-9~2-10では、表面塩分量の計算結果は、 観測結果より大きくなっている.この観測点は、堤防前 面に消波施設が設置されているとともに、岩礁が分布し ている地形条件である.岩礁付近で波が砕波することで、 堤防前面に到達する波の波高が低くなり、塩分量が減少 したと考えられる.今回の計算では、岩礁の分布は考慮 していないため、計算結果のほうが過大となっている.

以上の結果から,海岸の地形条件を空中写真から定量 化することで,消波施設が設置されているような海岸の 飛来塩分量(表面塩分量)を評価できることが示された.



図-17 塩分の平面分布図(植栽除塩率 0%)

5. 飛来塩分量(表面塩分量)の平面分布図の作成

(1) 平面分布図の作成方法および計算条件

定量化を行った沿岸部の飛来塩分量(表面塩分量)の算 定結果を参考に,飛来塩分量(表面塩分量)の平面分布図 の作成を行った.平面分布図は,算定式(5)を用いて汀 線付近の仮想的な塩分発生量 Cgを算定し,内陸部への 塩分量を算定式(3)により計算した.大気中の塩分粒子 は,風によって輸送されるため,内陸部への塩分の移動 方向は,風向に一致する方向とした.

平面分布図の作成のための計算は、新潟県の沿岸部の 海岸から内陸方向に 3~4km の範囲で行った. 塩分量は、 陸域を 10m×10m の格子に分割し、各格子の値を算定し た. 算定式(5)に設定する気象・波浪条件は、2016 年 12 月1日~2017年3月30日の期間で1時間間隔の値を設定 した. 算定式(3)の離岸距離による塩分量の低減率 β は、 本検討の観測結果から得られた β =0.038 を設定した. た だし、この値は、海岸から 200m 程度までの範囲から得 られた値であるため、離岸距離が長い場合に適用できな い可能性がある. そのため、今後、この係数については 再検討する必要がある.

(2) 平面分布図の計算結果

飛来塩分(表面塩分量)の平面分布の計算結果を図-17 に示す.図は、新潟県中央部に位置する新潟市周辺の分 布である.図の塩分量は、モルタル供試体で採取された コンクリート表層部の塩化物イオン量(単位 kg/m³)であり、 防風林(植栽)の影響を無視した結果である.図に示すよ うに、海岸から内陸部へ1km程度までの範囲で塩分が一 様に分布していることがわかる.汀線付近の塩分量は 15mg/m³程度である.

大気中の飛来塩分は、植栽に影響を受けて減少することが知られているため、植栽を考慮した計算を行った.



図-18 塩分の平面分布図(植栽除塩率 20%)



図-19 塩分の平面分布図(植栽除塩率 80%)

ただし、植栽の塩分除去率は、植栽の大きさや種類等に よって変化するため、塩分除去率を変化させた計算を実 施した.図-18 と図-19 は、植栽の塩分除去率(10m あた り)を 20%と 80%に設定した値である.図に示すように、 防風林による塩分除去効果を考慮した場合では、その背 後で塩分量が減少していることがわかる.また、塩分は、 信濃川の河口から進入している傾向があり、河川上に設 置されている橋梁に、比較的大きい塩分量が作用してい ることがわかる.

6. 結論

新潟県沿岸域を対象とした飛来塩分量の定量評価に関 する検討を実施し、以下のようなことが明らかになった。 新潟県沿岸部の気象・波浪条件および地形条件を考慮し て、個別の構造物に作用する飛来塩分量(表面塩分量)を 定量的に予測できる算定式を確立することができた。さ らに、塩分量の平面分布図(マップ)を作成し、新潟県沿 岸部における飛来塩分量(表面塩分量)を評価できること が明らかになった.

本検討では、塩分量の平面分布図の値については、設 定している係数の妥当性を検討することができていない ため、今後、現地観測を追加で実施し、その妥当性の検 証を行う予定である.また、現地観測の供試体の一部が 分析中であるため、後日、その結果を学会等で報告する 予定である.

参考文献

- 藤原 稔,作光 一,田中良樹:飛来塩分量全国調 査(III)―調査結果およびデータ集一,土木研究所資 料,第 2687 号, 266p., 1988.
- 2) 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.
- 中村文則,大原涼平,滝 晴信,下村 匠:大気中 に供給された海水飛沫の時間・空間的な変動に関す る現地観測とその予測解析,土木学会論文集 B2(海 岸工学), Vol.74, No.2, pp.I_1285-I_1290,2018.11
- 4) 領域気象モデル(Weather Research & Forecasting Model): http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/
- 5) 波浪推算モデル SWAN(Simulating WAves Nearshore), http://swanmodel.sourceforge.net/
- 6) 間瀬 肇,平尾博樹,國富將嗣,高山知司:SWAN を用いた日本沿岸波浪推算システム構築と適用性の 検証,海岸工学論文集,第48巻,pp.236-240,2001.
- 中村文則,大原涼平,井野裕輝,下村 匠:地形・波 浪条件による飛来塩分の発生・輸送過程への影響評 価とその数値実験,土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.73, No.2, pp.I_1345-1350, 2017.
- 松永信博,児玉真史,櫨田 操,香月 理:冬期季 節風下において消波護岸から発生した海水飛沫の陸 域への輸送に関する現地観測,土木学会論文集 No. 712/II-60,107-116,2002.
- 山田文則,細山田得三:日本海沿岸での飛来塩分の 実地観測とその対策法の評価,海洋開発論文集,第 20巻, pp.1103-1108, 2004.
- 10) 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, pp.1-20, 2010.
- 宇多高明,小俣 篤,小西正純:海岸からの飛来塩 分量の計算モデル,海岸工学論文集,第 39 巻, pp.1051-1056, 1992.
- 12) 村上和男,加藤一正,清水勝義,柳嶋真一,中村聡志,尾崎靖,福田真人,宮城啓司,山田邦明,西守男雄:飛沫の発生と擬似植栽による飛沫抑制効果に関する現地調査,港湾技術研究所報告,第34巻, 第4号, pp.302-311, 1995.
- 13) 久保弘一,井田康男:捨石堤背後の伝達波高について,第20回海岸工学講演会論文集, pp.49-54, 1973.