

論文 空中写真を利用した海岸環境の数値化とそれに応じた飛来塩分量の算定手法の開発

中村 文則*1・井野 裕輝*2・大原 涼平*3・下村 匠*4

要旨：コンクリート構造物の塩害対策を効果的に実施するためには、その要因となる構造物に作用する飛来塩分量を精度良く予測することが有効的である。本研究では、飛来塩分の発生量に関連する海岸環境の条件をパラメータ化するために、新潟県沿岸で飛来塩分の現地調査を実施し、海岸環境に応じた飛来塩分量の算定手法の開発を行った。さらに、海岸環境を数値化する簡易的な方法として、空中写真を利用する手法について検討を行った。その結果、空中写真を利用して海岸環境を数値化し、それに応じた飛来塩分量の算定手法を確立できたとともに、消波施設の設置により飛来塩分量が2倍程度増加することが明らかになった。

キーワード：塩害、飛来塩分、海岸環境、空中写真、現地調査

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物に作用する海域からの飛来塩分は、コンクリート内部の鉄筋を腐食させ、構造物に致命的な欠陥を引き起こす要因となる。このような構造物の欠陥に対して、塩害対策を効果的に実施するためには、その要因となる構造物に作用する飛来塩分量を精度良く予測することが有効的である。飛来塩分は、海域から発生し、大気中を風によって輸送されるような物質であるため、その予測精度を向上させるには、飛来塩分の発生・輸送・到達過程に関連する自然環境や構造物自体の形状などの条件を可能な限り考慮して予測することが重要となる。例えば、下記のような条件である。

- 1) 飛来塩分の発生過程に関連する条件：
海岸の構成材料(砂浜、岩礁)、砂浜幅、消波施設の有無とその設置位置、海底地形、波浪
- 2) 飛来塩分の輸送過程に関連する条件：
陸域地形、海岸からの距離、標高・地表面からの高さ、障害物(構造物、植栽)、気象(風速・風向)
- 3) 構造物への到達・付着過程に関連する条件：
構造物の形状および表面状況、構造物の設置方向、構造物周辺の気象条件(風向・風速、降雨)

既往研究では、これらの各過程に関連した条件を考慮して飛来塩分量を予測する方法として、数値シミュレーションを用いた研究が進められている。例えば、著者ら¹⁾および富山²⁾が報告しているような汎用的な数値シミュレーションを用いて、自然環境条件に応じた飛来塩分量を予測する手法である。このような方法により、構造物に作用する飛来塩分量を高精度で予測できることが報告されている。ただし、このような数値シミュレーション

を用いた方法では、計算負荷が大きいといった欠点があり、多くの橋梁の維持管理を対象にした場合に膨大な時間と労力が生じるといった問題がある。

そのため、このような研究と並行で簡易的な算定式による飛来塩分量の予測手法の研究が進められている。例えば、一般に広く利用されているものとしては、コンクリート標準示方書³⁾のような距離と高さによって、構造物の表面塩分量を定める方法である。また、宇多⁴⁾は、飛来塩分の全国調査結果を整理し、海岸の構成材料(砂浜、岩礁)を係数で区別した経験式を提案している。著者ら⁵⁾は波の波高と風速に応じて飛来塩分量を算定する算定図を報告している。これらの研究成果により、飛来塩分量と海岸からの距離および高さ、自然環境条件(風速)の関係は定量化されつつある。

しかしながら、実構造物では、それぞれの構造物で周辺地形および構造物自体の形状が異なるため、海岸からの距離や高さを定量化しただけでは、塩分量を十分な精度で予測することができない場合がある。例えば、海岸から対象とした構造物の間に障害物が多数されている場合などである。そのため、各過程に関連する条件を事前にパラメータ化しておき、それらを組み合わせで算定できるような手法が有効的である。ただし、構造物周辺の多くの条件をパラメータ化できていないのが現状である。

本研究では、飛来塩分の発生量に関連する海岸環境の条件をパラメータ化するために、新潟県沿岸で飛来塩分の現地調査を実施し、その結果から海岸環境に応じた飛来塩分量の算定手法の開発を行った。さらに、個別の海岸環境を数値化する簡易的な方法として、空中写真を利用する手法について検討を行った。

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科環境社会基盤工学専攻助教 博(工) (正会員)

*2 長岡技術科学大学大学院 工学研究科環境社会基盤工学専攻 学(工)

*3 長岡技術科学大学大学院 工学研究科材料工学専攻 修(工) (学生会員)

*4 長岡技術科学大学大学院 工学研究科環境社会基盤工学専攻教授 博(工) (正会員)

2. 飛来塩分量の現地調査

2.1 調査箇所および調査期間

新潟県沿岸に位置する海岸において、飛来塩分の現地調査を実施した。調査箇所は、新潟県の佐渡地方を除く沿岸全域である。この地域は、冬季の季節風の作用により、飛来塩分が大量に輸送される地域であり、橋梁等のコンクリート構造物の塩害も多数報告されている。調査期間は、2016年2月11日～5月5日の75日間である。

2.2 調査方法

飛来塩分の採取はモルタル供試体を用いて行った。供試体に用いたモルタルの配合を表-1に示す。セメントは普通ポルトランドセメント(密度 $3.16\text{kg}/\text{cm}^3$)、細骨材は川砂(密度 $2.96\text{g}/\text{cm}^3$)を用いた。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。供試体の暴露期間終了後は現地から分析室まで運び、モルタルを粉碎後、塩分量の測定を行った。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。

2.3 供試体の設置位置および測点の配置

塩分量の現地調査では、塩分を採取するための供試体は、橋桁へ作用する塩分量を直接測定するために、橋桁側面部に設置することが一般的である。ただし、橋桁に供試体を設置する方法では、設置位置で採取される塩分量が変化する可能性があり、海岸環境による違いを詳細

表-1 モルタル供試体の配合

水セメント比 (%)	単位量 (kg/m^3)		
	水	セメント	細骨材
50	306	612	1320

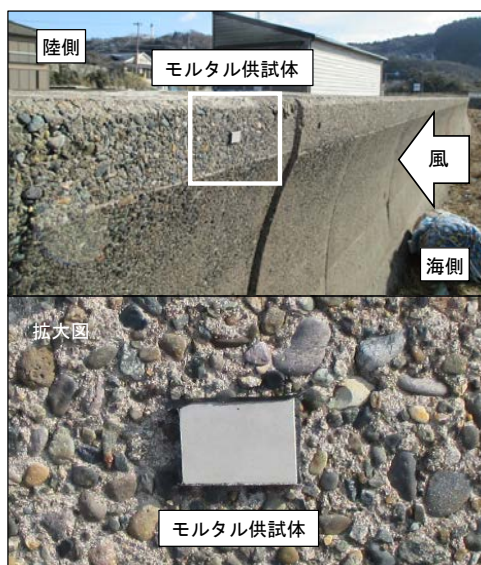


図-1 供試体の設置状況(直立堤防)

に評価することが困難となる。例えば、富山²⁾が橋桁の各部位を対象とした飛来塩分量を調査した結果では、各部位で作用する飛来塩分量が大きく異なることが明らかにされている。佐伯⁹⁾は、同一構造物の周辺であっても塩分の測定位置が少し離れただけで、周辺地形形状等のミクロな環境条件の影響を受けて塩分量が大きく異なる場合があることを報告している。海岸環境に応じた飛来塩分量の違いを把握するためには、陸域の障害物や構造物自体の形状の影響を受けない位置に供試体を設置する必要がある。本検討では、海岸環境が飛来塩分量に及ぼす影響を確認することが目的である。そのため、供試体を設置する構造物の形状が同様に、海域から設置位置までの間に障害物がない条件として、図-1のような海岸の直立堤防に供試体を設置することとした。ただし、すべての箇所直立堤防が設置されている状況ではないため、直立堤防に設置できない調査地点は、直立堤防以外の堤防や電柱、看板に設置した。

測点は図-2に示す34地点に配置した。調査地点は、砂浜幅、消波施設(消波ブロック)の有無の違いを把握できるように選定した。供試体の設置高さによっても測定される飛来塩分量が異なると考えられるため、測点No.18は堤防の高さ方向に地面から 0.0m 、 0.5m 、 1.0m 、 1.3m (天端付近)の位置に設置した。測点No.27は、同様の海岸での飛来塩分量の差を確認するために、沿岸方向の 0.5km の範囲に6点の測点を配置した。

2.4 供試体の設置位置の検討

飛来塩分を採取するための供試体の設置位置は、現地調査結果の飛来塩分量に直接関係する重要な項目である。そのため、数値シミュレーションを用いて堤防に到達する塩分量の分布について試算を行い、供試体の設置位置について検討を行った。

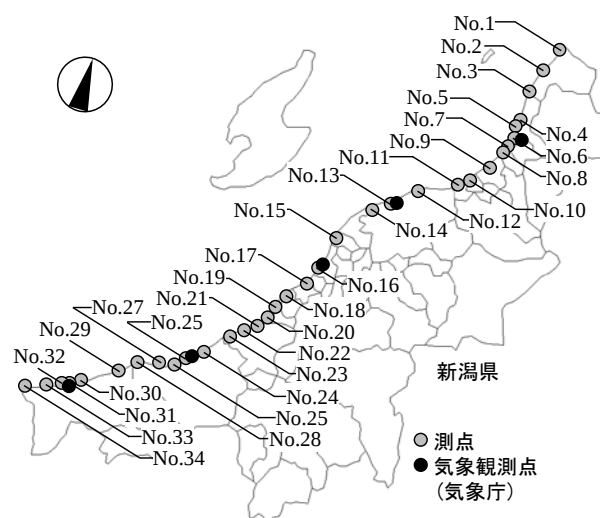


図-2 測点の配置

(1) 数値モデルおよび基礎方程式

数値モデルは、著者ら⁹⁾を参考に非圧縮 N-S 方程式モデルを用いて風の計算を行った。飛来塩分の大気中の輸送過程および構造物への到達過程は、風から受ける力を外力とした式(1)および(2)のような塩分粒子の運動方程式で計算を行った。

$$\frac{1}{2}C_D\rho_a(u-u_p)^2a_p=m_p\frac{\partial u_p}{\partial t}$$

$$\frac{1}{2}C_D\rho_a(v-v_p)^2a_p=m_p\frac{\partial v_p}{\partial t}$$

$$\frac{1}{2}C_D\rho_a(w-w_p)^2a_p-m_p(1-\frac{\rho_a}{\rho_p})g=m_p\frac{\partial w_p}{\partial t}$$

$$\frac{\partial x_p}{\partial t}=u_p, \quad \frac{\partial y_p}{\partial t}=v_p, \quad \frac{\partial z_p}{\partial t}=(w_p-w_s) \quad (1)$$

ここで、 x_p, y_p, z_p は塩分粒子の座標上の位置(m)、 u, v, w が風速(m/s)、 u_p, v_p, w_p が粒子の移動速度(m/s)、 g は重力加速度(m/s²)、 C_D は抵抗係数、 ρ_a, ρ_p は空気および海水の密度(kg/m³)、 a_p は粒子が風を受けた投影面積、 m_p は粒子の質量、 w_s は粒径に応じた粒子の沈降速度(m/s)、 t は時間(s)である。

(2) 計算条件および境界条件

計算領域は、図-3 のような海岸堤防周辺をモデル化した 3 次元地形で計算を実施した。海岸堤防前面の砂浜は勾配 1/10 の一定勾配とした。海岸堤防は、一般的な直立堤防として、天端幅 50cm の海岸側に波返しを設置されている形状とした。風の計算における計算格子間隔は、水平方向 0.050m、鉛直方向 0.025m である。

風速は 12m/s を設定し、飛来塩分粒子の粒径は 40 μ m を設定した。飛来塩分粒子の配置は、計算領域の海側に式(3)のような鉛直分布を与えた。

$$c(z)=c_0 \cdot \exp(a_w \cdot z) \quad (3)$$

ここで、 $c_0(=100)$ は底面での飛来塩分粒子数(個/m)、 $a_w(=-0.293)$ は飛来塩分粒子数の鉛直方向の減少率、 z は地表面からの高さ(m)である。計算に設定した塩分粒子数は 36 万個である。

(3) 供試体の設置位置の検討結果

図-4 は、堤防に到達した飛来塩分粒子の分布を示した結果である。図に示すように、飛来塩分粒子は、直立堤防の上部付近で到達数が多くなる傾向が見られる。また、堤防周辺の風速が異なる場合でも計算を実施したが、同様の傾向が見られたことから、供試体の設置位置は堤防上部の天端付近の海側面とした。

2.5 調査結果

(1) 供試体の設置位置による塩分量

供試体の設置位置による飛来塩分量の違いについて整理したものを図-5 に示す。図の値は、測点 No.18 に設置した高さが異なる位置での塩分量である。図に示す

ように、測定された塩分量は高い位置で大きくなる傾向があり、堤防天端付近で塩分量が 4.36kg/m³、高さ 0.0m 付近で 1.47kg/m³ であった。これは、事前に実施した計算結果と同様の傾向であり、堤防前面に砂浜があるような海岸であれば、堤防の天端付近で塩分量が高くなる傾向があることが調査結果からも確認できる。

(2) 各測点の塩分量

図-6 は、各測点で採取された塩分量を整理した結果である。白色の棒グラフは消波施設の設置がない海岸である。図に示すように、海岸に設置した供試体の塩分量

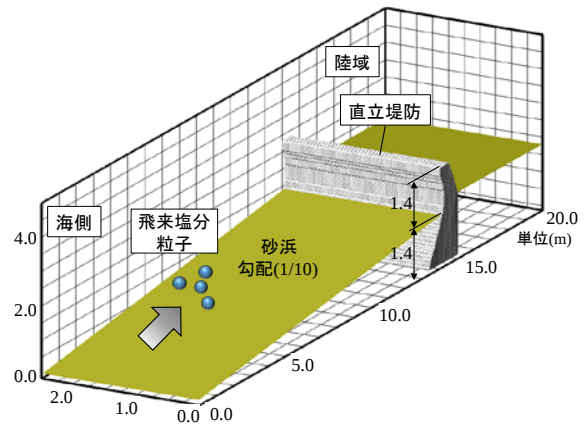


図-3 計算地形

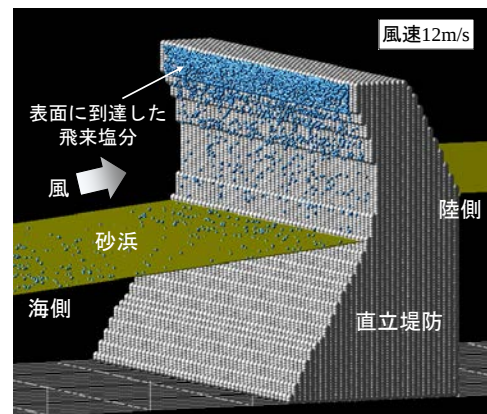


図-4 堤防表面への飛来塩分の到達分布

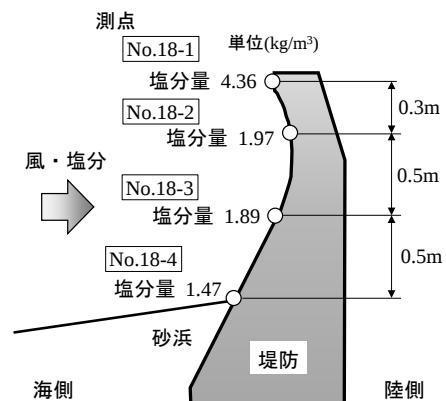
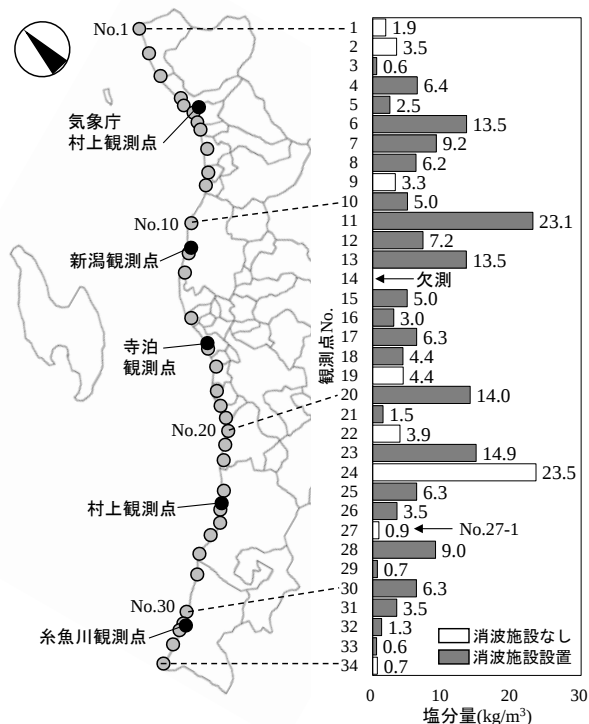
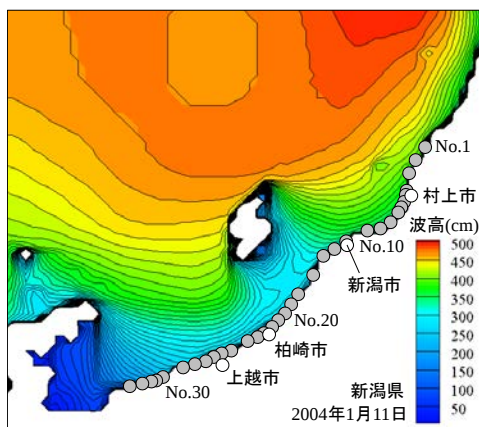


図-5 鉛直方向の塩分量の調査結果(測点 No. 18)



図－6 新潟県沿岸の飛来塩分量の調査結果

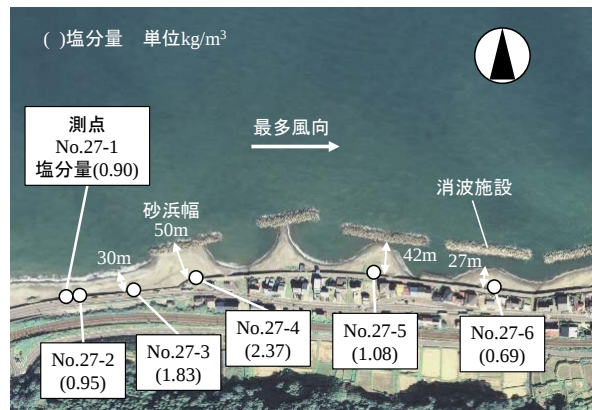


図－7 新潟県沿岸の波高分布の推定結果

は、新潟県の沿岸方向にばらついて分布している傾向が見られる。図－7 は、山田ら⁷⁾を参考に波浪推算モデル (SWAN)を用いて高波浪時の新潟県沿岸の波高分布を再現計算した結果である。図では、佐渡の背後で波高が低くなっていることが確認できる。飛来塩分の発生は波浪に関係するため、波高が低減している測点 No.14～23 周辺で塩分量が小さくなると想定していたが、測点 No.20 および 23 では塩分量が大きくなっており、波浪に関係するような傾向は明確に見られなかった。これは、各海岸の局所的な地形や自然環境作用の違いのほうが、飛来塩分量に大きく影響しているためであると考えられる。

(3) 個別の海岸(測点 No.27)の塩分量

測点 No.27 の海岸の状況と飛来塩分量の調査結果を図－8 に示す。この海岸は、他の測点と比較して全体的に



図－8 測点 No.27 における海岸環境と塩分量

砂浜幅は短く、No.27-1 付近で 20～30m 程度、No.27-5 付近で 42m 程度であり、図の中央部から右側部にかけて消波施設が多数設置されている。

現地調査で採取された塩分量は、図の測点 No.27-1～6 の平均が 1.23kg/m³ であり、砂浜幅が 50m 程度の他の海岸で測定した塩分量 3.3(No.9), 5.0(No.15), 3.5kg/m³ (No.26) と比較しても少ない傾向であった。山田ら⁸⁾の研究で消波ブロックなどの消波施設が陸域の近くにある海岸では、飛来塩分量が大きくなることが報告されているが、それと逆の傾向になっている。これは、海岸に作用している風の影響であり、調査期間中の風の最多風向が西向で海岸線に対して平行な風であった。この風により、風上の遠く離れた位置で発生した飛来塩分が、大気中で減少しながら測点位置まで輸送されるため、塩分量が減少したと考えられる。この結果から、砂浜幅や消波施設の位置などの海岸環境から飛来塩分量を推定する場合、海岸に作用する風の風向を考慮することが予測の精度向上につながるという。

3. 空中写真を利用した海岸環境の数値化

3.1 海岸環境の数値化および空中写真の収集

現地調査で得られた結果から海岸近傍の塩分量は、海岸環境に応じた局所的な条件を数値化し、算定式に組み込むことができれば、簡易的な計算で飛来塩分量の予測精度を向上させることが可能である。海岸環境を簡易的に数値化する方法として、空中写真を利用する方法が有効的であると考え、その検討を行った。

空中写真は、国土地理院⁹⁾が公開している写真と Google によって提供されている Google earth⁹⁾を用いた。国土地理院が公開している写真は、各測点で撮影された最新のものを利用した。Google earth は、空中写真を観覧することが可能であり、さらに写真上で緯度・経度および距離を測定することができる。今回はこの機能も合わせて利用し、海岸環境の数値化を行った。

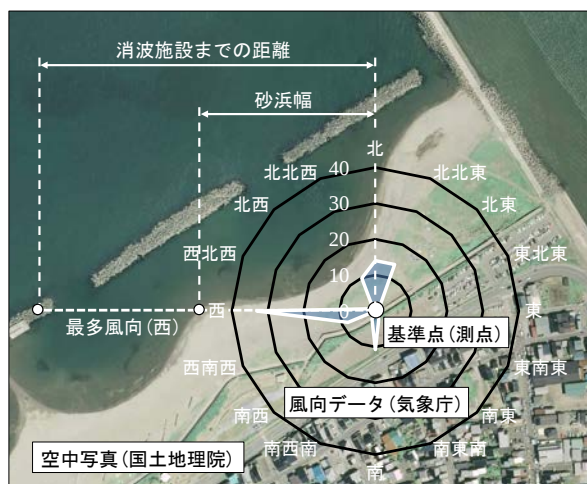


図-9 空中写真を利用した海岸環境の測定方法

3.2 海岸環境の数値化の方法

(1) 空中写真から数値化する海岸環境の項目

空中写真から判別できる海岸環境の項目としては、海岸の構成材料(砂浜・岩礁等)、消波施設の有無(設置位置)とその種類、砂浜幅、海岸の方向、その他の障害物の有無(設置位置)とその種類がある。の中で、飛来塩分量に大きく影響を及ぼす項目として、砂浜幅、消波施設の有無とその設置位置、海岸の方向の数値化を行った。

(2) 数値化するための測定方法

海岸の砂浜幅および消波施設の位置は、空中写真上で基準点を決定し、そこからの距離を測定して数値化した。飛来塩分の予測は、風向を考慮することが重要であることがわかったため、砂浜幅および消波施設の位置の測定には、海岸に作用する風の最多風向を考慮した。最多風向の算定は、気象庁¹⁰⁾が公開している風速・風向データを整理し、海岸線に垂直な $\pm 90^\circ$ の範囲で平均風速 2.1m/s 以上のときの風向を整理した。最多風向の区分は16方位である。新潟県沿岸では、6つの気象庁の観測点が海岸近傍に設置されており、村上、新潟、寺泊、大潟、糸魚川観測点の5点の観測結果を利用した。

図-9は、国土地理院が公開している空中写真を用いて、各項目の測定方法を示した一例である。この海岸の最多風向は西向であり、砂浜幅は基準点から空中写真の海と陸の境界までの距離とした。消波施設の設置位置は、砂浜幅と同様の方法で、基準点から消波施設までの距離を測定した。消波施設の種類は、消波ブロック、人工リーフなど様々な種類があるが、今回の検討では種類の判定は行っていない。空中写真から測定した各測点の海岸環境を整理したものを表-2に示す。表の設置角度は、設置した供試体の暴露面に垂直な角度であり、今回は角度の違いによる塩分量への影響は考慮しないこととした。

ただし、空中写真から海岸環境を測定する場合では、空中写真の撮影時の潮位や波浪の状況に影響を受けて砂

表-2 空中写真から測定した海岸環境

測点 (No.)	砂浜 幅(m)	消波 施設 距離 (m)	設置 角度 (°)	塩分 量 (kg/m^3)	測点 (No.)	砂浜 幅(m)	消波 施設 距離 (m)	設置 角度 (°)	塩分 量 (kg/m^3)
1	96	—	300	1.9	18	67	126	283	4.4
2	29	—	308	3.5	19	19	—	296	4.4
3	32	63	276	0.6	20	77	167	296	14.0
4	29	62	280	6.4	21	252	—	308	1.5
5	80	163	298	2.5	22	35	—	344	3.9
6	0	0	303	13.5	23	15	0	306	14.9
7	30	0	316	9.2	24	47	—	315	23.5
8	26	24	320	6.2	25	109	—	321	6.3
9	56	—	324	3.3	26	107	339	327	3.5
10	58	154	347	5.0	27	270	—	352	0.9
11	0	0	324	23.1	28	32	97	300	9.0
12	40	159	314	7.2	29	127	—	346	0.7
13	0	7	329	13.5	30	109	109	345	6.3
14	43	36	329	欠測	31	174	138	325	3.5
15	57	0	276	5.0	32	153	165	329	1.3
16	33	166	302	3.0	33	153	281	335	0.6
17	44	107	317	6.3	34	115	—	328	0.7

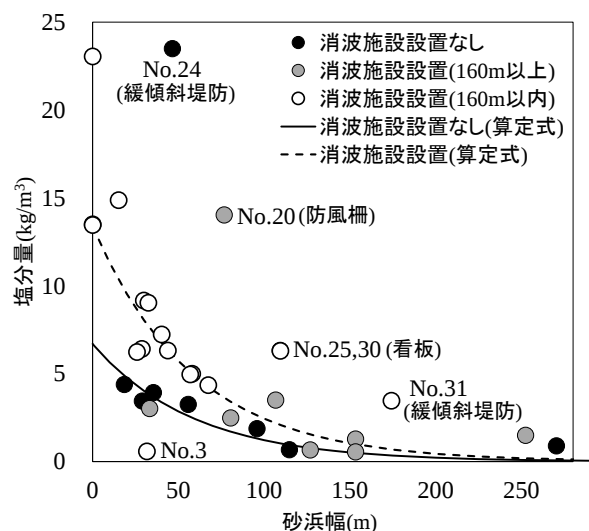


図-10 砂浜幅と飛来塩分量の関係

浜幅が変化するため、これらの修正方法を考えていく必要がある。今回、対象としている日本海側では海域の潮位差が小さいため潮位による影響は少ないが、波浪の影響による砂浜幅の変動はいくつかの測点で見られた。

4. 数値化した海岸環境に応じた飛来塩分量

4.1 砂浜幅と消波施設の有無の影響

空中写真から測定した砂浜幅と飛来塩分量を整理した結果を図-10に示す。図の黒色の丸印は消波施設が設置されていない海岸、白色は施設が設置されている海岸、灰色は施設が測点から160m以上離れている海岸である。

図に示すように、砂浜幅の増加にしたがい飛来塩分量が減少している傾向が見られる。また、塩分量でばらつきが見られる測点 No.20, 24, 25, 30, 31は、直立堤防以外に供試体を設置したものである。塩分量が少ない測点 No.3は、直立堤防の天端ではなく、堤防天端と地表面

の中間位置に設置した結果である。この結果より、塩分量は、供試体を設置した構造物の形状や設置位置の影響を受けて変化していることがわかった。

海岸に設置されている消波施設の有無を確認した場合は、白色の印で示す消波施設が設置されている海岸のほうが、塩分量は大きい傾向が見られる。灰色で示す消波施設が測点から離れた位置にある条件では、消波施設が無い海岸の調査結果と同程度の塩分量となっている。この結果より、飛来塩分量は消波施設の有無だけでなく、その設置位置にも影響されており、消波施設が基準点から十分に離れることで塩分量の増加が小さくなるといえる。今回の調査結果では、対象地点から 160m 以上離れた位置で塩分量が減少する傾向が見られた。ただし、これは海底地形に応じた波浪や消波施設の構造形式(施設の幅・高さ、ブロックの種類、不透過等)によって差があると考えられる。

4.2 飛来塩分量の算定手法と消波施設の有無の定量化

海岸環境を考慮した飛来塩分量の算定式として、海岸での飛来塩分の発生量、砂浜幅、消波施設の有無を考慮した式(4)について検討を行った。

$$c_s = c_g \cdot \alpha \cdot \exp(-\beta \cdot x) \quad (4)$$

ここで、 c_s は海岸環境を考慮した飛来塩分量(kg/m³)、 α (=1.0)は消波施設による飛来塩分量の増加率、 x は砂浜幅(m)、 β (=0.017)は砂浜幅による塩分量の減衰率の係数である。 c_g は海域での飛来塩分の発生量(kg/m³)であり、施設設置なしの調査結果の近似曲線から 6.69kg/m³ とした。

図-10の実線は、式(4)の算定式による結果を示したものである。図に示す実線は、消波施設が無い海岸および消施設が遠くにある海岸での調査結果をよく再現できており、塩分量は砂浜幅に対して指数的に減少する傾向にあることがわかる。次に、消波施設の有無の影響を定量化するために、消波施設の設置による塩分量の増加率 α の感度解析を実施した。図の点線は、消波施設による影響を示す係数 α を 2.0 にしたときの算定結果である。図に示すように、係数 α を 2.0 にすることで、消波施設が設置された海岸の調査結果を算定式で再現できることがわかる。ただし、今回の消波施設による塩分量の増加率を定量化するには調査結果の測点数が少なく、調査期間も短いと考えられるため、より精度の良いパラメータを求めるには追加調査が必要である。

5. 結論

本研究では、空中写真を利用した海岸環境の数値化とそれに応じた飛来塩分量の算定手法について検討を行った。その結果、空中写真を利用して海岸環境を数値化し、それに応じた飛来塩分量の算定手法を確立できたとともに、消波施設の設置により飛来塩分量が 2 倍程度増加す

ることが明らかになった。

今後は、海岸環境に応じた飛来塩分の現地調査を引き続き実施し、その結果を追加することで算定式のパラメータの精度を向上させていく予定である。

謝 辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費「塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の表面到達塩分の予測システムの開発」(研究代表者：中村文則、課題番号：26870810)および公益財団法人ユニオンツール育英奨学会「コンクリート構造物の長寿命化のための塩害予測技術の高精度化」(研究代表者：中村文則)の一環として行ったものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村文則、生田麻実、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
- 2) 富山 潤、羽瀧貴士、宮里心一、中林靖：コンクリート橋梁上部工に付着する塩分量分布に関する数値実験、コンクリート工学年次論文集、Vol.37, No.1, pp.769-774, 2015.7
- 3) 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
- 4) 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, 1992.11
- 5) 中村文則、下村 匠、生田麻実、細山田得三：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、コンクリート工学年次論文集、Vol.37, No.1, pp.775-780, 2015.7
- 6) 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, 2010.1
- 7) 山田文則、細山田得三、上村雄一：波浪推算モデルを援用した飛来塩分の発生・輸送過程に関する数値解析とその現地観測、海岸工学論文集、第 53 巻、pp.1141-1145, 2006.11
- 8) 山田文則、細山田得三：海岸構造物周辺のしぶきから発生する飛来塩分の輸送とその長期的観測、海岸工学論文集、第 51 巻、pp.1121-1125, 2004.11
- 9) 国土交通省国土地理院(地図・空中写真観覧サービス)：<http://mapapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1>
- 10) Google Earth：<https://www.google.co.jp/intl/ja/earth/>
- 11) 国土交通省気象庁(過去の気象データ検索)：<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/>