

## 1.1 本研究の背景

コンクリート構造物の塩害劣化予測を行う場合、その表面塩化物イオン濃度が境界条件として最もよく用いられる。海岸付近のコンクリート構造物表面の塩分は、消波ブロック等での砕波や海面での気泡の破裂によって発生した海水粒子が風によって輸送され、表面に到達したものである。そのため、表面塩化物イオン濃度は、波高や海岸地形・消波構造物の有無などによって大きく変化する。土木学会新潟会による新潟県沿岸部の飛来塩分調査<sup>1)</sup>では、構造物の形状などの構造条件や、日照時間・波浪条件・風向・風速・降雨・降雪などの気象条件や立地条件など、個別の条件などによっても異なることが明らかとなっている。他にも、表面塩分量が経時的に変化する傾向を示すデータが多く報告されている事などから、塩害劣化の予測精度向上には、適切な表面塩化物イオン濃度の設定が必要不可欠であると言える。

しかし、今日の塩害劣化予測に多く用いられている、土木学会コンクリート標準示方書に示される Fick の拡散方程式を用いた線形拡散モデルにおいては、海岸からの距離、及び地区区分のみを入力値としている。なお、飛来塩分の実測データ等があればそちらを用いてもよいとされているが、現実には多くの場合はこの表の値が用いられている。この手法によって与えられた表面塩化物イオン濃度では、多様な外部環境や構造物の特性を補えておらず、結果として過剰な耐久性能を要求する事が起こりうる。合理的な耐久設計を可能とするためには、個別の構造物の環境条件をよりの確に評価する方法が必要となる。

本研究室においても、構造物の環境条件に関する研究が進められてきた。青木の研究では、飛来塩分量と表面塩分量・浸透塩分量の関係性について検討されており、配合や飛来塩分量などが各塩分量に影響することが確認された。しかし、検討ケースは配合に着目した3種のみと少なく、知見を深めるためには、異なる条件を設定し、更なる検討を行う必要があると言える。また、山下の研究では、雨水

等による表面塩分の洗い流し効果が検討され、効果が確認された。しかし、洗い流しを行った際の表面塩分がどのような挙動を示しているのかは明らかとなっていない。

また、実構造物の詳細な塩分分布に関する情報資料も不足しているのが現状である。塩害を受けた実構造物の調査が必要であると言える。

## 1.2 本研究の目的

本研究では、前項で述べた背景のもと、以下を目的とし、研究を行った。

(1)配合以外に着目点をおいたモルタル供試体の暴露試験を行い、その飛来塩分量、表面塩分量、塩分浸透性状の関係を実験的に求める。

(2)塩害環境下にて長期間供用された実構造物の表面塩分の分布と塩分の侵入状況を調査し、飛来塩分や雨水等の環境作用との関係を明らかにする。

(1)については、均一な飛来塩分環境を再現できる風洞型飛来塩分再現装置を用いて、飛来塩分量、コンクリート表面の状態、試験体の厚さをパラメータとした実験を行う。

(2)については、新潟県沿岸部にて自転車橋として36年間供用された「鱗崎橋」なる構造物の調査を行い、その特性についての検証試験も行う。

## 2. 実験概要

### 2.1 モルタル供試体を用いた塩分浸透性状の実験的検討

#### 2.1.1 検討ケース・供試体

検討ケースを表-1に示す。実験パラメータは、到達塩分量、塩分供給面の状態、供試体厚さの3つとした。到達塩分量については、その多少が表面塩分量や浸透塩分量に影響を及ぼすのか検討した。供試体厚さについては、厚さ10mmのものを「薄」、160mmのものを「厚」とし、塩分浸透性状の比較を行う。薄いものと厚いものが近似的に同じとみなせる場合、薄い供試体の暴露試験結果で構造物の表面付近の塩分浸透性状を再現出来ることになる。供試体の概要を図-1に示す。塩分供給面の状態は、通常モルタル供試体を「ペースト面」、供試体をコンクリートカ

ッターで切断し、骨材が露出したものを「切削面」と呼ぶこととし、通常、セメントペースト部分を通じて行われる、塩分の拡散移動への影響を検討した。塩分供給面の状態を図-2 に示す。塩分供給面以外はタールエポキシでシールし、塩分が侵入しないようにした。

### 2.1.2 暴露・塩分量調査方法

本試験では風洞実験装置（図-3）を用いて、暴露試験を行った。本風洞は一周約 10m、1m×1m の断面を有する。塩水粒子発生装置より発生した塩水粒子が造風ファンによって作り出された気流に乗り、供試体設置位置まで到達する構造である。この風洞装置内に供試体を 48 日間暴露した。分析の試料は表面、表層(0~2.5mm)、深部(2.5~10mm)の 3 点から採取し、イオンメーターにより全塩分量を測定した。

### 2.2 実構造物の塩分量調査

対象構造物は、新潟県糸魚川市能生で、自転車道の一部として供用されていた鱗崎橋である。鱗崎橋は 1974 年に製造されたプレテンション PC4 主桁橋であり、橋長 10.4m (支間 9.8m) の単純 I 桁橋である。海岸から約 15m の距離に位置していたため、塩害による鋼材腐食が進行していた。なお、調査を行うにあたり、4 つの桁の内最も海側の桁を A 桁と呼び、以降山側に向うにつれ B, C, D と呼ぶこととする。

#### 2.2.1 調査項目

##### (1) 表面付着塩化物イオン量

図-2 の緑線の位置において海側、山側、下面の 3 点とし、1 桁 30 箇所、計 120 箇所調査を行った。

##### (2) 浸透塩化物イオン量

図-4 の赤丸の位置がウェブ部、青丸の位置がフランジ部の調査位置を示す。各位置でコア抜き(φ100)を抜き、図-5 に示す位置の試料をドリル穿孔によって採取した。

(1), (2)によって得られた試料を JCI-SC4 に概ね則り、全塩分量を測定した。

### 2.3 構造物表面における水の移動が表面付着塩分量の分布に及ぼす影響

後述する鱗崎橋桁下面における特異な表面塩化物イオン量の分布(図-x)がどのような影響を受けて形成された

表-1 検討ケース

| ケースNo | 暴露位置 | 到達塩分量(mdd) | 供試体厚さ | 塩分供給面 |
|-------|------|------------|-------|-------|
| 1     | 1F a | 2.4        | 厚     | ペースト  |
| 2     | 1F b | 2.8        | 薄     | 切削    |
| 3     | 1F c | 2.3        | 薄     | ペースト  |
| 4     | 1F d | 10.9       | 厚     | ペースト  |
| 5     | 1F e | 9.5        | 薄     | 切削    |
| 6     | 1F f | 9.7        | 薄     | ペースト  |

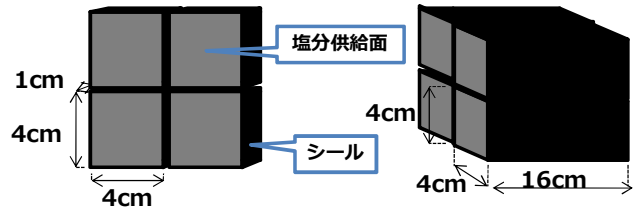


図-1 供試体概要



図-2 塩分供給面の状態

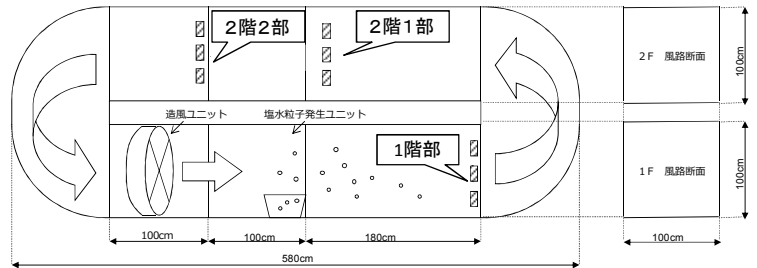


図-3 風洞型実験装置

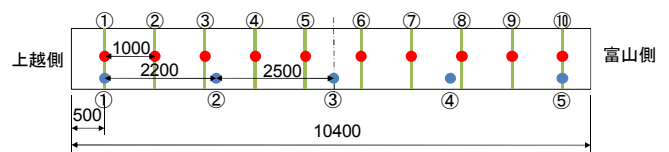


図-4 各桁の調査位置

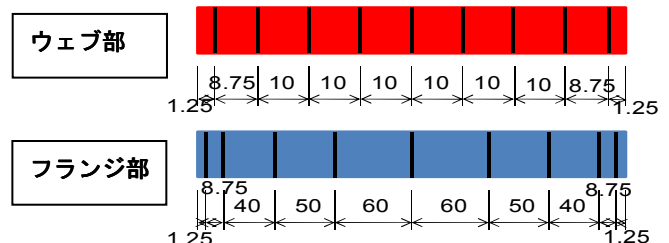


図-5 コア供試体分析位置 (mm)

ものであるか検討を行う。要因としては、(1)到達塩分

量が位置によって異なる場合。(2)降雨による洗い流し効果に伴う塩分の運搬。が考えられる。しかし、(1)については、現地における到達塩分量の調査の結果、可能性が低いことが示された。従って、(2)についての検討を行う。鱗崎はPC桁を採用しているため、桁には若干の反りがあり、桁下面には傾きが生じている。コンクリート表面が壁面の様に垂直な面ではなく、鱗崎橋の様に僅かな傾きの場合、付着した雨水等の水分は桁端部に向い徐々に移動しながら滴下してゆき、同時に表面塩分も洗い流し効果により端部へ運ばれていくと考え、検証実験を行った。

### 2.3.1 試験方法

桁下面における水の移動を再現するため、あらかじめ塩分を付着させた供試体下より適量の水を噴霧し、供試体に与えた角度によって水が移動するという構造とした。試験装置の概要を図-6、供試体の形状を図-7、分析位置を図-8(図中の赤字の地点)、実際の試験状況を図-9に示す。

降雨等によって供試体表面に付着した水分は、主に、水分が付着した面の傾きによってもたらされると考えられる。そのため、塩分付着面の角度をパラメータとし、①0° ②0.2° (鱗崎橋の傾きの再現)③0.5° ④45° の4水準とした。また、水の噴霧量、圧は一定とし、吹きつけられた水分が移動、集中して、水滴がいくらか滴下する程度とした。供試体表面の初期付着塩分は、一般的な霧吹きを用いて25%NaCl水溶液を吹き付けることで約5mg/dm<sup>2</sup>を均一に付着させた。

## 3. 結果及び考察

### 3.1 モルタル供試体を用いた塩分浸透性状の実験的検討

図-10, 11に表面塩化物イオン量、浸透塩化物イオン量の経時変化を示す。これより、到達塩分量の多いケース(青線)は到達塩分量の少ないケースより表面及び浸透塩化物イオン量が少なくなることがわかる。次に、ケース5とケース6の結果を比較すると、表面塩化物イオン量はケース5の方が多く、浸透塩化物イオン量はケース6の方が多い。これより、塩分供給面に骨材の露出したものは、表面付着少なくなることがわかる。また、厚さ160mmのケース4と厚さ10mmのケース6の表面付着及び浸透塩化物イオン量が異なることから、厚さ10mmの供試体をより厚みのある供試体の10mm部分と同じとはみなせないことが

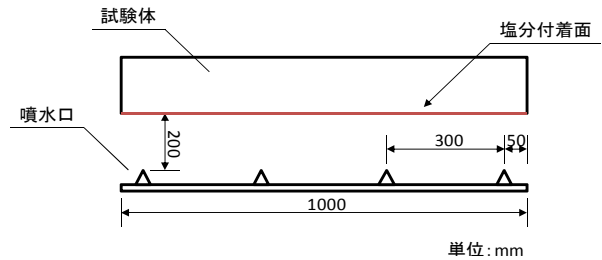


図-6 試験装置概要

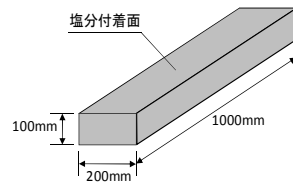


図-7 供試体概要

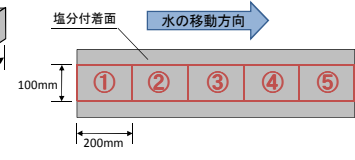


図-8 塩分分析位置



図-9 試験状況

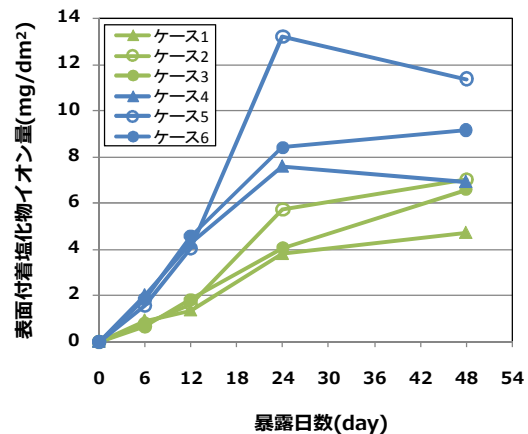


図-10 表面付着塩化物イオン量の経時変化

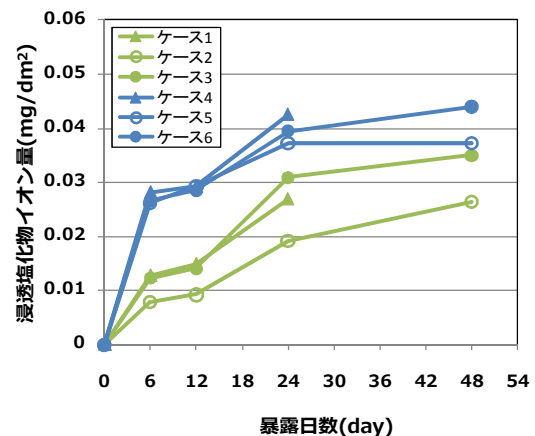


図-11 浸透塩化物イオン量の経時変化

わかる。図-12 に表面付着塩化物イオン量と到達塩分量(塩化物イオン量で表記)の関係を示す。これより、供試体表面に到達塩分量と表面付着塩化物イオン量に関係性が伺える。また、図-13 に示した表面付着塩化物イオン量とfick の拡散方程式に従い内部塩分分布より算出した表面塩化物イオン量の関係からも関係性を伺える。従って、到達塩分量より表面塩化物イオン量を評価出来る可能性が示唆された。

### 3.2 鱗崎橋の塩分浸透性状

図-14, 15, 16 に各分析位置の表面付着塩化物イオン量の分布を示す。まず、表面付着塩化物イオン量は桁の下面、海側、山側の順に高い値を示していることがわかる。しかし、A 桁のみ、下面と山側が同程度の値を示し、海側の値が最も低い結果となった。これは、A 桁が降雨による洗い流しの効果を多くうけた結果だと考えられる。また、桁毎の平均付着塩化物イオン量は、B, C, D, A の順であった。飛来塩分環境を考えると A 桁が最も高い値を示すはずであるが、洗い流し効果により低い値を示したのだと考えられる。洗い流し効果を受けにくいと考えられる山側みの結果を見ると、A, B, C=D の順であった。なお、桁下面に見られる、端部へ向かうほど塩化物イオン量が多くなる現象については、「構造物表面における水の移動が表面付着塩分量の分布に及ぼす影響」において検討する。

図-17, 18 にウェブ部とOフランジ部の浸透塩化物イオン量分布の例を示す。これより、表層の塩化物イオン量が低い値を示していることがわかる。鱗崎橋では中性化が確認されたため(海側 5mm, 山側 15mm), この影響である可能性が高い。中性化したコンクリートは塩分の固定化率が低下する。従って、表面から中性化が進行した場合、全塩分の分布は表層付近で低くなる。また、山側より海側で高い値を示す傾向を示した。なお、塩化物イオン量は全ての位置におい

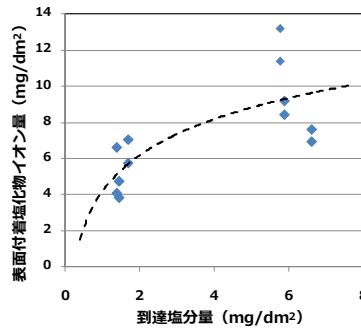


図-12 表面付着塩化物イオン量と到達塩分量の関係

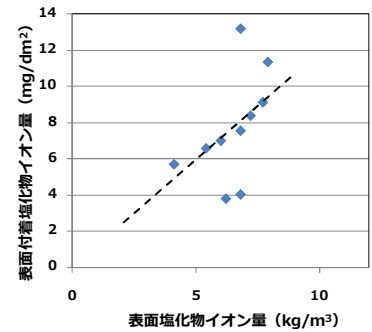


図-13 表面付着塩化物イオン量と表面塩化物イオン量の関係

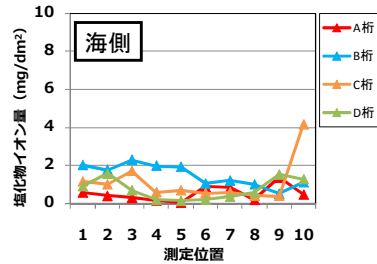


図-14 表面付着塩化物イオン量

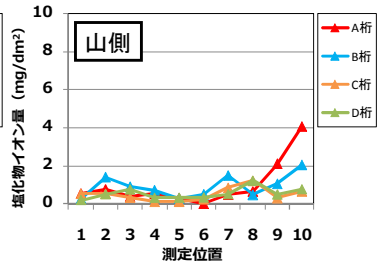


図-15 表面付着塩化物イオン量

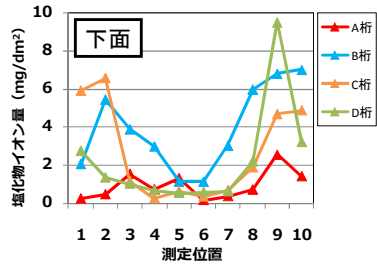


図-16 表面付着塩化物イオン量

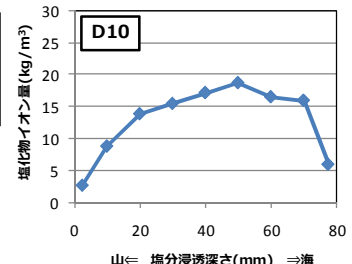


図-17 浸透塩化物イオン量

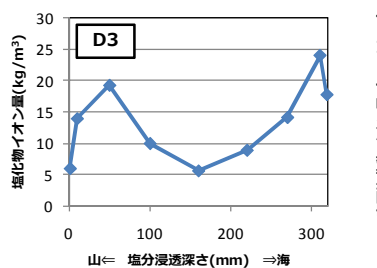


図-18 浸透塩化物イオン量

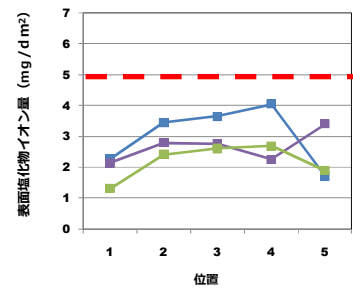


図-19 表面付着塩化物イオン量

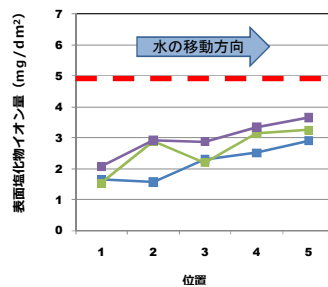


図-20 表面付着塩化物イオン量 (供試体角度 0.2°)

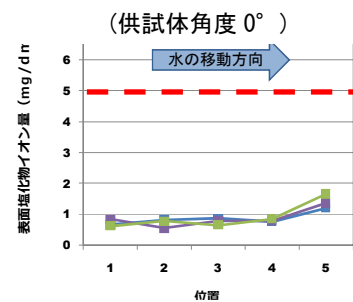


図-21 表面付着塩化物イオン量 (供試体角度 45°)

て発錆限界とされている  $1.2\text{kg/m}^3$  を超えている。

### 3.3 構造物表面における水の移動が表面付着塩分量の分布に及ぼす影響

各水準の結果を図-19, 20, 21 に示す。各水準で3回の試験を行った。なお、 $0.5^\circ$  のものは割愛した。図-19より、塩分の減少が確認出来ることから、表面に付着した水分が滴下することで表面付着塩分を減少させることが明らかとなった。また、 $0.2^\circ$  の結果より、水の移動方向で塩分が多くなっていることがわかる。降雨による洗い流し効果とは、構造物壁面に付着した水分に表面の塩分が溶解し、水分が表面を流れ落ちることで表面付着塩分が洗い流されるというものである。しかし、このケースのように傾きが緩やかであると、上方より移動した水分は全て滴下せず、図-22 の様にコンクリート表面に停留し、そこで蒸発するため塩分が残留し、図-20 の様な分布となったと考えられる。 $0.5^\circ$  のケースの結果は、 $0.2^\circ$  のケースの傾向をより強く示した。図-21 の  $45^\circ$  のケースでは、ほとんどの塩分が洗い流され、水の流れ落ちる端部で僅かに高い値を示す結果となった。 $45^\circ$  の供試体では、表面に付着した水分のほとんどが流れ落ちたため、 $45^\circ$  以上の傾きをもつもの、例えば  $90^\circ$  のものでも同様の傾向が示されると推察される。これより、鱗崎橋桁側面において、下面と同様の傾向が見られなかったことが説明できる。

## 4. まとめ

- (1)理想的に制御された塩害環境下では到達塩分量から表面塩化物イオン量を評価できる可能性が示された。
- (2)鱗崎橋桁下面では、桁端部ほど表面付着塩化物イオン量が高くなる現象が観察された。この現象は、桁側面では観察されなかった。
- (3)表面を移動する水分によって表面付着塩分が運搬されることがあると確認された。これより、鱗崎橋桁下面の現象は、雨水等の移動に伴う塩分の移動が主要因である可能性が高いと考えられる。



た水が停留する様子