一般財団法人新潟県建設技術センター

令和2年度研究助成報告書

新潟県における実構造物の塩害劣化予測と

その検証に関する事業

令和3年3月

研究代表者

長岡技術科学大学 中村文則

新潟県における実構造物の塩害劣化予測と その検証に関する事業

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、冬季の激しい気象・波浪条件により、沿岸部に設置されたコンクリート構造物において塩 害が生じるため問題となっている。このような塩害を効率的に対策していくためには、新潟県における気 象・波浪条件を考慮して実構造物に作用する飛来塩分とそれに応じたコンクリート構造物内部の鉄筋の腐 食過程を予測できる技術を確立することが必要である。本事業では、新潟県における気象・波浪条件を考 慮した構造物の塩害劣化の予測モデルを確立するために、構造物表面に作用する飛来塩分と降雨の予測モ デルの構築を行った。さらに、飛来塩分と降雨を再現した模型実験を行い、構築したモデルの検証を行っ た。その結果、構築した予測モデルにより、構造物の外部環境作用を考慮して、コンクリート構造物表面 に到達する飛来塩分と降雨粒子を予測できることが示された。さらに、模型実験の結果から、構造物の各 部位表面における塩分量は、降雨作用前後で分布に大きく差がないことが明らかになった。

キーワード: 塩害,飛来塩分,コンクリート構造物,模型実験,数値シミュレーション

1. はじめに

新潟県では、冬季の激しい気象・波浪条件により、沿 岸部に設置されたコンクリート構造物において塩害が生 じるため問題となっている。このような塩害を効率的に 対策していくためには、新潟県における気象・波浪条件 を考慮して実構造物に作用する飛来塩分とそれに応じた コンクリート構造物内部の鉄筋の腐食過程を予測できる 技術を確立することが必要である。

コンクリート内部の鉄筋の腐食過程については、既往 研究が盛んに実施され、コンクリート表面・表層部の塩 分量(塩化物イオン量)を与えることで予測できるように なっている。構造物内部の鉄筋腐食解析の境界条件とな る表面・表層部の塩分量については、コンクリート標準 示方書 『に記載されている海岸からの距離に応じて、構 造物の表面塩化物イオン量 Coの定める方法が広く利用 されている。一方で、飛来塩分は、気象・波浪条件、周 辺の地形、構造物の形状などによって到達する量が異な るため、構造物が設置されている条件によっては、距離 だけでは正確に予測できない場合がある。

近年では、そのような問題を解決するために、気象・ 波浪条件を考慮した飛来塩分の予測モデル^{3,3,4}が報告 されている。例えば、研究代表者ら^{3,3}は、気象・波浪 条件を考慮した飛来塩分の発生・輸送モデルを開発し, 新潟県の橋梁を対象とした予測を行っている。その結果 から,新潟県の気象・波浪条件を考慮して橋梁周辺に作 用する飛来塩分の輸送量を予測できることを報告してい る。

しかしながら、これらの研究により、構造物に周辺に 作用する飛来塩分量の予測モデルは確立できているが、 その結果に大きく影響を及ぼす降雨の影響についてはモ デル化が進んでいないのが現状である。例えば、降雨作 用による表面の雨かがり範囲の予測や降雨による塩化物 イオン量の洗い流し作用、コンクリート中に浸透する塩 化物イオン量への影響などである。このような降雨と飛 来塩分の両方の作用を複合して予測できる方法を確立す ることで、コンクリート構造物の表面・表層の塩分量 (塩化物イオン量)を的確に予測できるようになる。

本事業では、新潟県における気象・波浪条件を考慮し た構造物の塩害劣化の予測モデルを最終的に確立するた めに、構造物表面に作用する飛来塩分と降雨の予測モデ ルの構築を行った。さらに、飛来塩分と降雨を再現した 模型実験を行い、構築したモデルの検証を行った。この 事業は、将来的に実務分野に直接適用できる予測モデル を確立することを目的としたものであり、大規模な実験 施設を用いて、詳細な検証を実施する点に有用性がある。

2. 新潟県沿岸部での塩害環境作用

新潟県沿岸部における塩害環境作用を把握するために, 新潟県を中心とした北陸から東北地方で,飛来塩分の現 地観測を行った。

(1) 観測方法と観測点の配置

現地観測は、2019年11月30日~2020年3月19日の期間(2019年度研究助成期間)に実施した。観測場所は、北陸地方を中心に石川県、富山県、新潟県、山形県、秋田県の沿岸部の212箇所である。観測方法は、モルタル供試体を暴露し、そこに含まれる塩化物イオン量を測定する方法した。供試体の寸法は、縦30mm、横40mm、厚さ5mmである。供試体は、海岸に設置されている直立堤防の天端部の海側面に設置した。

(2) 塩害環境の観測結果

図-1 は、飛来塩分の現地観測結果を各位置で整理した結果である。図の棒グラフの高さが塩化イオン量の値である。図に示すように、設置位置に応じて塩化物イオン量が変化していることがわかる。観測結果の塩化物イオン量は、秋田県から新潟県北部で大きくなっており、新潟県南部から石川県能登半島東側の範囲では、局所的に小さくなっている。この結果から、佐渡島を含めた新潟県沿岸部では、飛来塩分量が大きい箇所が多く、沿岸部に設置された構造物が厳しい塩害環境作用を受けていることがわかる。

このような環境では、海域の波浪から発生した飛来 塩分の粒子が、コンクリート構造物表面に作用すると ともに、降雨粒子による水分の供給や塩分の洗い流し 作用が生じていると考えられる。新潟県のような厳し い環境に対応できるようにするために、構造物各部位 に作用する飛来塩分と降雨粒子を予測できる数値モデ ルの構築を行った。



図-1 飛来塩分の現地観測結果

構造物に作用する飛来塩分および降雨粒子の 予測モデルの構築

(1) 数値モデルの概要

コンクリート構造物の劣化の要因となる飛来塩分粒子 は、大気中を風によって輸送され、構造物に到達する。

その後、構造物表面に到達した塩分粒子(塩化物イオン) は、降雨の洗い流し作用によって、コンクリート表面を 移動・再配分する。そのため、コンクリート構造物の表 面・表層部の塩化物イオン量を詳細に予測するには、降 雨と飛来塩分の到達とその後の表面の移動を予測できる 数値モデルの構築が必要である。

研究代表者らは、既往研究³で飛来塩分の輸送・到達 過程の数値シミュレーションを開発しており、実構造物 を対象とした予測計算が可能なことを報告している。一 方で、コンクリート構造物に作用する降雨の到達および 降雨の表面の流動範囲(雨ががり)を予測する方法につい ては、十分に検討されていないのが現状である。そのた め、コンクリート構造物の各部表面に作用する飛来塩分 と降雨粒子の数値シミュレーションモデルの構築を行っ た。

(2) 基礎方程式

1) 風況モデル

構造物周辺の風況の計算は、大気中の空気を非圧縮 性流体と考え、式(1)および(2)に示す3次元の連続式とナ ビエ・ストークス方程式により計算を実施した。

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} =$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial u}{\partial z} \right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} =$$

$$-\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial v}{\partial z} \right) \qquad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} =$$

$$-\frac{\partial p}{\partial z} - g + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(v_t \frac{\partial w}{\partial z} \right)$$

ここで, *t* は時間(sec), *x*, *y*, *z* は 3 次元座標(m), *u*, *v*, wは *x*, *y*, *z* 方向の風速(m/s), *p* は圧力(Pa), *g* は重力加速

度(m/s²), viは風の乱流拡散係数(m²/s)である。

風況の乱流モデルは,流体計算で幅広く使用されている*k*-ε乱流モデルを用いた。乱れエネルギーの輸送方程式と粘性散逸率の輸送方程式は式(3)と(4)である。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\upsilon_i}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \upsilon_i \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\upsilon_i}{\sigma_{\varepsilon}} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + C_1 \upsilon_i \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$$
(3)

ここで、kは乱れエネルギー量、 ϵ は粘性散逸率、 α (=1.0)、 α_{ϵ} (=1.3)、 C_1 (=1.44)、 C_2 (=1.92)はそれぞれ格子乱流やチャ ンネル乱流の基礎実験データをもとに求められた係数、 添え字 *i*、*j*、kは*x*、*y*、*z*に対応した座標である。これら の計算から求められた値を用いて、乱流粘性係数 μ は式 (5)により算出した。

$$v_t = \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \tag{5}$$

ここで, *C*_μ(=0.09)は係数, ρは大気の密度(kg/m³)である。 計算境界部は自由流出境界として式(6)とした。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_a \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = v_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$$
(6)

ここで, uaは断面での主流方向速度の平均値(m/s)である。 2) 飛来塩分粒子および降雨の輸送・到達過程モデル

大気中の飛来塩分粒子の輸送と到達過程は、大気中の 飛来塩分粒子を球体と仮定し、そこに作用する風の抗力 および重力、浮力、慣性力のつり合いから計算を実施す るモデルを構築した。塩分粒子の運動の支配方程式は、 浮力を考慮した式(8)を用いた。

$$\frac{1}{2}C_{D}\rho_{a}(u-u_{p})^{2}a_{p} = m_{p}\frac{\partial u_{p}}{\partial t}$$

$$\frac{1}{2}C_{D}\rho_{a}(v-v_{p})^{2}a_{p} = m_{p}\frac{\partial v_{p}}{\partial t}$$
(8)

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

ここで, up, vp, wp は粒子の移動速度(m/s), Cb は抵抗係 数, ap は粒子の風を受ける投影面積(m²), mp は粒子の質 量(kg), pa, pp は空気と飛来塩分粒子の密度(kg/m³)である。 この式の左辺第1項は風によって飛来塩分粒子が受ける 抗力, 左辺第2項は自重によって作用する力,右辺第1 項は飛来塩分粒子が持つ慣性力である。飛来塩分粒子に 作用する周辺の風速は,粒子の中心からその周辺の風速 の計算格子点までの距離で重み付を行い,それを平均化 した値を与えた。

飛来塩分粒子の移動距離は式(9)で計算を行った。

$$x_{p(t+\Delta t)} = x_{p(t)} + u_p \cdot \Delta t + R_x$$

$$y_{p(t+\Delta t)} = y_{p(t)} + v_p \cdot \Delta t + R_y$$

$$z_{p(t+\Delta t)} = z_{p(t)} + (w_p - w_s) \cdot \Delta t + R_z$$
(9)

ここで、 x_p , y_p , z_p は飛来塩分粒子の位置を示した座標 (m)である。 w_s は飛来塩分粒子の沈降速度(m/s)であり, 流体中を自由落下する自重を持つ粒子の運動をモデル化 し,その計算結果を与えた。 R_x , R_y , Rは拡散項であり, 式(10)で計算した。

$$R_{x} = R_{y} = R_{z} = \sqrt{24 \cdot K \cdot \Delta t} \cdot \{0.5 - R(0)\}$$
(10)

ここで,Kは拡散係数(m²/s),R(0)は0~1の乱数である。 飛来塩分粒子が空気による抵抗を受けながら落下する 場合,時間とともに加速する自由落下運動となるため, 粒子の沈降速度は式(11)で計算を行った。

$$\frac{4}{3}\pi r^{3}\rho \frac{\partial w_{s}}{\partial t} = -\frac{1}{2}\rho_{a}C_{D}w_{s}^{2}\pi r^{2} + \frac{4}{3}\pi r^{3}\left(1 + \frac{\rho a}{\rho}\right)g$$
 (11)

ここで、rは飛来塩分粒子の半径(m)である。抵抗係数Cb はレイノルズ数(0.1~240程度)に応じて変化する値であ る。この方程式の左辺第1項は慣性力、右辺第2項は空気 抵抗、右辺第2項は浮力を考慮した重力項である。

4. 環境作用を再現した模型実験

構造物の各部位表面に作用する降雨と飛来塩分の到達 過程とその洗い流し作用後の表面塩分の損失・再配分の 過程を明らかにするために、降雨と飛来塩分の構造物へ の到達過程に関する模型実験を実施した。さらに、模型 表面における降雨作用後の表面塩分量の分布を測定し、 その結果についても考察を行った。



図-2 環境作用再現施設





図-3実験施設の平面図と断面図

(1) 実験場所および実験模型

実験は、新潟県長岡市の長岡技術科学大学の構内に図 -2 ような施設を構築して実施した。この施設は、風お よび降雨、飛来塩分の自然環境作用を再現できるもので あり、施設内部に鉄筋コンクリート製の模型が設置され ている。施設全体の概要図を図-3示す。施設内には、 風況を再現するための送風機、降雨発生機、塩分噴霧器 が設置されており、両側面に高さ 3.7m の側壁が設置さ れている。

施設の風上側には,送風機 12 基が2列に配置されて おり,風速0.0~6.0m/s程度の風を送風できる仕組みにな っている。降雨は,散水型ノズル(いけうち製)6 個を利 用して,高さ3.2mの位置から水粒子を上向きに散水す る方法で再現した。飛来塩分は,直径100pm程度の微小



図-4 飛沫粒子の噴霧状況





な飛沫粒子を噴霧できる噴霧ノズル(いけうち製)を利用 して図-4のように再現した。このノズルは、空気と塩 水(または水)に圧力を作用させる構造のものである。実 験では、鉛直方向に8個の噴霧ノズルを設置した。

実験で使用した模型は、図-5 のような橋桁側面の一 部を模擬した鉄筋コンクリート製の2種類である。寸法 は、高さ2.20m(地表面から2.50m)、幅1.60m、奥行1.80m である。

(2) 実験方法および実験条件

実験は、送風機で風を送風し、降雨粒子または飛来塩 分粒子を一様に発生させる方法で実施した。風速は模型 から風上に 3m の位置で、風速 0.0m/s と 3.8m/s 程度の条 件となるように調整した。降雨水量は、無風時の模型近 傍で1時間当たり 30mm 程度の条件とした。飛来塩分粒



図-7 降雨水量の測定点の配置

子は、中村ら⁷を参考に、実際の海岸近傍で輸送されて いる直径 100µm 程度の飛来塩分粒子を再現し、模型表面 に作用させた。

測定項目は、模型周辺の風速、模型表面に到達した降 雨水量、飛沫粒子の到達量である。風速は、小型プロペ ラ風速計(Testo 製)を利用して、1 秒間隔で 5 分間の測定 を行い、その結果を平均した。模型表面への降雨の到達 量は、スポンジ供試体を利用して測定を行った。この供 試体は、直径 5.5cm の円形のプラスチック製の容器に給 水スポンジを設置したものであり、そのスポンジに到達 した降雨水量を測定した。実験では、模型表面に供試体 を設置し、降雨を4分間作用させた。その後、供試体の 重量を測定し、その結果を単位面積・時間当りの水分量 に換算した。

飛沫粒子の到達量は、中村ら³を参考に、感水試験紙 を利用して測定を行った。この試験紙は、直径 50μm 程 度までの飛沫粒子の痕跡を可視化できるものであり、寸 法が 76mm×52mm である。これをアクリル板に張り付 け、模型のコンクリート表面に設置した。その後、飛沫 を 20 秒間作用させ、感水試験紙に到達した飛沫の痕跡 をデジタルカメラで撮影した。撮影した画像から、到達 した飛沫の痕跡の大きさを測定し、大気中の粒子粒径に 換算し、飛沫到達量を算定した。

(3) 測定点の配置および実験ケース



(b) 模型 B

図-8 飛沫の到達量の測定点

表-1 実験ケース

| | 模型形状 | 風速 | 降雨 | 飛沫 |
|-------|------|----|----|----|
| Case1 | А | | 0 | _ |
| Case2 | В | | | |
| Case3 | А | 0 | 0 | _ |
| Case4 | В | | | |
| Case5 | A | 0 | | 0 |
| Case6 | В | | | |

風速の測定点の配置を図-6 に示す。風速は、図のような No.S-1~6の6 地点に、鉛直方向に 10 点の測定点を 配置した。測定位置は、模型中央部(横断方向の模型端 部から 0.8m)の位置である。

降雨水の測定点は、図-7のように断面 No.1~3の3列 に配置した。模型 A の測定点は1列当り18点であり、 合計54点を配置した。模型の張出部の下向面には、1列 当り4点を配置した。模型 B は1列当り14点の合計42 点である。

飛沫粒子の測定点は、図−8 のように模型表面全体に 鉛直方向に No.1~7 の 7 列を配置した。模型 A の断面 No.1 と断面 No.7 で測定点を 1 列当り 17 点,それ以外の 断面 No.2~6 で 18 点の合計 124 点の測定点を配置した。



模型Bでは、測定点が断面No.1とNo.7で1列当り12点、 それ以外の断面No.2~6で13点の合計89点である。

実験ケースは,**表-1**のような模型形状と風速,降雨, 飛沫の作用の有無を変化させた6ケースである。さらに, 模型周辺の風速の分布を確認するために風のみを作用さ せたケースを実施した。

(3) 実験結果および考察

1) 模型周辺の風速の測定結果

模型周辺の風速の鉛直分布を図-9 に示す。図に示す ように、模型 A と模型 B 周辺における風速の鉛直分布 は、模型表面から 3.0m の位置でほぼ同様の傾向を示し ており、鉛直方向の風速の平均値が 3.8m/s 程度であった。 模型近傍の模型から 0.02m および 0.25m の位置では、模 型Aと模型Bで風速の鉛直分布に差が見られる。図の黒 色印の模型 A(張出有)の結果では、模型形状の影響を受 け、地表面から高さ 0.5~1.0m の位置で風速が大きくな っている傾向が見られる。高さ 1.4m 以上の模型上部で は、模型近傍で風速が 1.0m/s 程度と小さくなっている。 これは、風速計で測定している風速が水平方向であるの に対して、模型近傍の風が上下方向に卓越しているため であると考えられる。

図の赤色印の模型 B では、模型から 0.25m の位置で、 風速が鉛直方向にほぼ一定となっている。模型近傍では、 高さ 1.4m 以上の範囲で風速が 1m/s 程度であり、地表面 に近い位置で大きくなる傾向であった。

2) 模型表面の降雨到達量の測定結果

模型表面の降雨作用の状況を図-10 に示す。図(a)の風 速がない Casel では、高欄の天端部に溜まった降雨水が 壁面部に流れるような状況であった。模型下部の部分に は、降雨水が到達していない状況である。図(b)の降雨 と同時に風を作用させた Case3 では、模型側面に降雨が 直接作用するような状況であり、図のように模型下部に も降雨の作用が見られた。この結果から、模型表面への 降雨作用範囲は、周辺の風の作用に影響を受けて変化す

(a) Case1 (模型 A / 風速なし)

(b) Case3(模型 A / 風速あり) 図-10 降雨作用後の表面塩分量の分布図

ることが示された。

模型表面の降雨到達量の実験結果を図-11(a)と(b)に示 す。図の値は、鉛直方向に3列に配置した測定点の結果 の平均値である。図(a)は、風が無風の条件であり、降雨 到達量が模型上部で650ml/m²/min 程度と大きくなってい る。一方で、模型の上端(上向面)以外の壁面では、降雨 水がほとんど到達していない結果である。この結果から、 Casel と Case2 のような無風条件では、降雨粒子が鉛直方 向の壁面にほとんど到達していないことがわかる。

図(b)は風と降雨を同時に作用させた条件での降雨到

これらの結果から、模型表面の降雨水の到達量は、風 の条件および模型形状に影響を受けて変化していること が示された。さらに、張出がある模型では降雨が遮蔽さ れる範囲があることがわかった。

3) 模型表面の飛沫粒子の到達量の測定結果

図-12 は、模型表面の飛沫粒子の到達量を示した実験結果である。図の結果は、感水試験紙で粒径 50µm 以上の飛沫粒子の到達量を測定した結果である。図(a)は模

型Aの到達量である。図に示すように、到達量は、模型 表面全体に一様に到達するのではなく、模型上部と下部 の各壁面で差が見られる。模型下部では、到達量が地表 面に近い位置で大きく、張出部付近で小さくなる傾向が 見られる。これは、大気中に噴霧した飛沫粒子が自重で 沈降することにより、地表面に近い位置に大きい粒径の 飛沫粒子が集中しているためであると考えられる。

また、図より、模型 A における張出の下面(下向壁面) では、飛沫粒子がほとんど確認できなかった。今回の感 水試験紙を利用した測定方法では、粒径 50µm 以下の飛 沫粒子を採取できていないため、微小な飛沫が到達して いる可能性がある。図(b)は、模型Bの到達量の測定結果 である。図に示すように、飛沫粒子の到達量は、壁面全 体で若干の差が見られる。模型上部と下部では、下部の ほうで到達量が大きくなる傾向があるが、模型Aと比較 して、その差が小さいことがわかる。

以上の結果より,模型表面の飛沫到達量は,模型Aの 下部で到達量の分布の差が大きくなる傾向があり,模型

図-13 降雨作用後の表面塩分量の分布図

の形状に応じて変化していることが示された。

4) 降雨作用後の表面塩分量の測定結果

降雨作用後の模型の表面塩分量の分布を把握するため に、飛沫粒子の到達過程の実験と同様の施設を利用して、 降雨作用後の表面塩分量の分布について測定を行った。 実験は、これまでの実験方法と同様に風と飛沫粒子を同 時に作用させ、模型表面に塩分を供給し、その後、降雨 を作用させる方法とした。風速は、模型から 3m の位置 で平均風速 3.8m/s の条件である。飛来塩分は、飛沫発生 機により、濃度 3%の塩水を 80 分間噴霧することで再現 した。模型表面への飛来塩分粒子の作用後に、模型表面 を乾燥させるために、風のみを 30 分間作用させた。そ の後、風と同時に降雨を 30 分間作用させた。作用させ た降雨量は、降雨到達量の実験条件と同様の 30mm/hour である。

降雨作用後の表面塩分量の測定は、蛍光X線法測定機器(オリンパス製)を用いて、表面・表層部の塩化物イオン濃度の測定を行った。測定は降雨作用後から4~8時間後に行い、その期間の天候は晴れであった。測定点の配置は、飛沫粒子の到達量の測定と同様の位置であり、

模型 A の測定点が 124 点, 模型 B が 89 点である。測定 した表面塩分量は, すべての測定点の最大値を 1.0 とな るように無次元量に換算した。

図-13 は、飛来塩分の供給後に降雨を作用させた場合の表面塩分量の測定結果である。図(a)に示すように、 模型Aの表面塩分量は、模型下部で大きく、上部では少ない傾向が見られる。模型Aの上部と下部の一部では、 降雨の作用により、模型表面の塩分が洗い流されるため、 降雨が作用する前の飛沫到達量の分布と異なるものと考 えられる。しかしながら、降雨作用前の Case5 の結果と 比較して、塩分量の分布に大きく差が見られなかった。 これは、今回の実験のような短期的な降雨作用では、降 雨の洗い流しによる表面塩分の損失量や再配分量が小さ いためであると考えられる。Nguyen ら⁵の既往研究の結 果でも、短期的な降雨作用の条件では減少量が小さいこ とが示されており、その傾向と同様である。

一方で、模型Aの張出部の下向面やその周辺の一部で は、表面塩分量の割合が高い傾向となっている。この範 囲は、感水試験紙で測定した Case5 では、飛沫粒子がほ とんど到達していない部分である。これは、感水試験紙 では測定ができていない粒径 50µm 以下の微小な飛来塩 分粒子が壁面に到達している影響であると考えられる。 今回測定に使用した感水試験紙は、直径 50µm 以下の粒 子には反応しないため、微小な飛沫粒子の到達量が測定 できていない。実際は、粒径 50µm 以下の飛来塩分粒子 も、模型表面に到達し、それに伴い塩分が供給されてい ると考えられる。

図(b)に示す模型Bでは、表面塩分量の割合が模型下部 で若干大きい傾向があるが、表面全体で大きな差がない ことがわかる。模型Bでは、表面に一様に降雨が作用し ており、表面塩分が一様に洗い流されたと考えられる。 この結果も、模型Aの場合と同様に表面塩分量の分布が 降雨作用前(Casc6)と同様の傾向であった。

以上の結果から,短期的な降雨作用では,降雨の作用 前後で表面塩分の分布に大きな差は生じていないことが 明らかになった。

5. 構築した数値シミュレーションモデルの検証

(1) 計算条件および境界条件

構築した数値シミュレーションの妥当性の検証を行う ために、実験を再現した予測計算を実施した。計算領域 を図-14 に示す。計算は、屋外の実験場を再現した長さ 12.0m,幅 3.1m,高さ 8.0mの空間で実施した。風速は、 模型から 5.0mの計算境界部から流入した。計算で設定 する降雨粒子は、模型実験結果と一致するように、降雨 粒子の直径 0.2~1.3mm(中央粒径 0.55mm)を設定した。飛 来塩分粒子の粒径は直径 50~70µm(中央粒径 60µm)であ

図-14 計算領域および境界条件

る。計算条件は, 張出部がある模型形状Aを対象に, 風 速と降雨を再現した Case3(風と降雨作用), Case5(風と飛 来塩分)とした。

(2) 計算結果および考察

1) 風速の計算結果

風速の計算結果と観測を比較したものを図-15 に示す。 図に示すように、風速の計算結果は、若干差が見られる が、実験結果をおおむね再現できていることがわかる。 風速は、地表面から高さ 1.0~2.0m 程度の位置で大きく 地表面から高い位置と低い位置で小さくなる傾向が見ら れる。この計算結果を利用して、降雨粒子の到達と飛来 塩分粒子の到達過程の計算を実施した。

2) 模型に作用する降雨水粒子の到達量の計算結果

図-16 は、模型に作用した降雨粒子の到達過程の計算 結果である。図より、降雨粒子は、模型上部全体と模型 下部の一部に到達していることがわかる。降雨粒子は、 模型表面全体に作用するのでなく、張出部のような模型

図-16 降雨粒子の到達状況

形状と風の作用に応じて,到達する範囲が変化すること がわかった。

図-17 は、模型表面に到達した降雨水量の計算結果と 実験結果を比較した結果である。図に示すように、降雨 水の到達量の計算結果は、模型下部で一致していない部 分も見られるが、降雨が到達する範囲の傾向は再現でき ている。ただし、今回は、設定する降雨粒子の粒径など の設定条件によって、到達する降雨粒子の範囲が変化す るため、今後、計算に設定する粒径などの条件について も検証を行う予定である。

3) 模型に作用する飛来塩分粒子の到達量の計算結果

図-18 は、構造物表面に到達した飛来塩分粒子の到達 分布を示した結果である。図に示すように、模型上部に は飛来塩分が一様に到達しており、模型下部では、降雨 粒子と比較して広い範囲で粒子が到達していることがわ かる。模型下部の上側(張出部周辺)では、飛来塩分粒子 の到達数が少ない傾向である。これは、風の影響による ものであると考えられる。図-19 は、模型周辺の風の状

図-18 飛沫(飛来塩分粒子)の到達状況

図-19 模型周辺の風速の分布

況を示したものである。図では、模型下部(張出下部)の 部分に風の渦が形成されており、その渦の影響で飛来塩 分粒子が局所的に到達しない箇所ができたと考えられる。

図-20 は、飛沫(飛来塩分粒子)の到達量の計算結果と 模型実験結果を比較したものである。図に示すように、 飛沫の到達量は、模型下部で実験結果をおおむね再現で きているが、模型上部では差が見られる。この差は、模 型上部周辺を流れる風の影響であると考えられる。計算 結果の風速は、模型上部の壁面前面において、実験結果 より大きい傾向があり、その風況の差によって計算結果 の到達飛沫量が大きくなったといえる。この点について は、今後、追加実験により詳細な実験データを取得し、 構築した予測モデルの一部または計算設定条件を確認す る予定である。

6. まとめ

本申請事業では,新潟県における気象・波浪条件を考 慮した構造物の塩害劣化の予測モデルを確立するために, これまで十分に研究が進んでいなかった飛来塩分と降雨

図-20 飛来塩分粒子の到達量の検証結果

の到達過程の予測モデルの構築を行った。さらに、大規 模な模型実験を実施した。その結果、構築した予測モデ ルにより、構造物の外部環境作用を考慮して、コンクリ ート構造物表面に到達する飛来塩分と降雨粒子を予測で きることが示された。さらに、模型実験の結果から、構 造物の各部位表面における塩分量は、降雨作用前後で分 布に大きく差がないことが明らかになった。

今後は、コンクリートの表層部への降雨の浸透量を考 慮した降雨水の流動過程、降雨の流動による表面塩分量 の再配分の過程について、詳細な実験を行うとともに、 その物理過程を予測できる数値シミュレーションの開発 を行う予定である。

参考文献

- 1) 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,下村 匠,大原涼平,細山田得三:飛来塩 分の予測シミュレーション技術の開発と構造物の長 期的な塩害環境作用の評価への適用,土木学会論文 集 E2, Vol. 75, No. 2, pp. 60-79, 2019.
- 3) 中村文則,井野裕輝,大原涼平,下村 匠:橋桁表面 に到達する海水飛沫粒子の到達量および粒径分布の 現地観測とその数値解析,日本材料学会コンクリー ト構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集, 第18巻, pp. 317-322, 2018.
- Wattanapornprom, R. and Ishida, T.: Comprehensive numerical system for predicting airborne chloride generation and its ingress in concrete under actual environmental conditions, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 16, pp. 18-35, 2018.
- 5) Nguyen Ho Quang, 中村文則, 井向日向, 山口貴幸, 下村 匠:降雨作用を受けるコンクリート構造物の 表面・表層部の表面塩分量に関する実験, コンクリ ート構造物の補修・補強・アップグレード論文報告 集, 第20巻, pp.215-220, 日本材料学会, 2020.