

# コンクリート構造物における劣化促進物質の表面分布予測

コンクリート研究室 山科裕海  
主指導教員 中村文則

## 1. はじめに

沿岸部に設置されているコンクリート構造物はひび割れ発生や剥離などを引き起こす塩害劣化が問題となっている。このような問題を解決するためには塩害劣化を正確に予測する必要がある。

塩害劣化はコンクリート表面に付着した塩分が浸透し鉄筋を腐食させることで生じ、そのような塩分の浸透を予測する上で、表面に付着する塩分量を正確に推定することが重要である。表面塩分量はコンクリート内部への浸透現象、コンクリート表面への塩分到達現象、コンクリート表面から塩分がなくなる損失現象により定まっており、これらの3つの現象を明らかにすることで推定することができる。塩分浸透についてはこれまで多くの研究がされており、十分に検討されているが、塩分到達および損失現象は検討項目が多く十分に解明されていないのが現状である。塩分到達現象の検討項目として構造物の形状による影響があり、形状の違いによって到達する塩分量が変化することが考えられる。また塩分損失現象の起因として降雨があり、降雨が付着することでコンクリート表面の塩分が洗い流されることがわかっている。しかし、構造形状を考慮した塩分の付着特性と降雨の到達・洗い流しによる表面塩分量は明らかにした研究は少ない。そこで本研究では構造形状を考慮した塩分の付着分布特性と降雨の到達・洗い流しによる表面塩分量の把握を目的に、実寸大模型による実験と再現解析を実施した。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験施設及び実験方法

本実験では構造物表面への降雨水と塩分の到達量の分布を定量化し、降雨作用後の表面塩分量の分布についての測定を行い、その結果について検討を行う。構造物表面における付着塩分量を把握するために、実構造物の一部を模擬した模型を製作し、自然環境作用を再現できる施設で実験を実施した。模型は鉄筋コンクリート製であり、実橋梁を参考に図-1に示す2種類の形状とした。実験施設は自然環境作用を再現する為、図-2に示すように送風機、飛沫発生機、降雨発生装置、実験模型が配置されており、模型に風、降雨、飛沫粒子を同時に作用させることが可能となっている。

### 2.2 測定項目

本実験において測定を実施する項目を以下に示す。

- ・ 模型に到達する降雨量

模型表面に到達する降雨量は、図-2に示すように風と降雨を4分間同時に作用させ、給水スポンジを用いて測定を行った。

- ・ 模型に到達する飛沫量

模型表面に到達する飛沫量は、図-2に示すように風と飛沫を同時に20秒間作用させ、感水試験紙を用いて測定を行った。

- ・ 降雨作用後の表面塩分の分布

実験では、図-2に示すように実際の飛来塩分粒子を再現した濃度3%の塩水の飛沫を80分間模型に噴霧し、その後、風のみを30分間作用させ、最後に降雨と風を同時に30分間作用させた。降雨作用後の表面塩分濃度は蛍光X線分析計を用いて測定を行った。

実験で作用させた風の風速は、模型から風上に3mの地点で、3.8m/s程度の条件となるように調整しました。

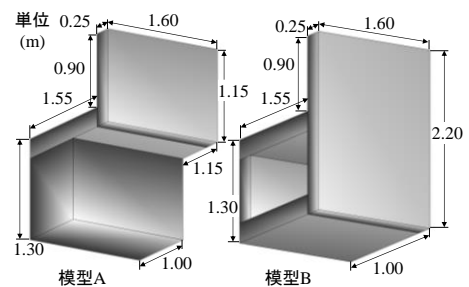


図-1 実験模型

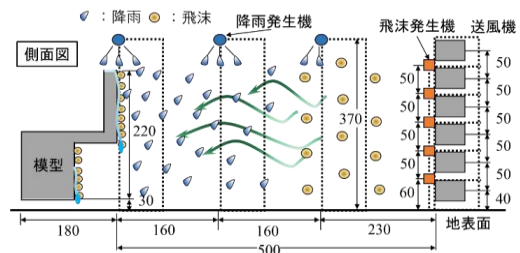


図-2 実験施設と測定項目

## 3. 降雨・飛来塩分粒子到達過程の数値解析

### 3.1 使用モデルと計算領域と境界条件について

本解析では実施した実験の再現解析を行う。再現解析では降雨・飛沫粒子の到達過程の再現を実施するために、粒子を運ぶ流体の挙動を計算する必要がある。本解析では粒子を運ぶ大気を非圧縮性流体であるとし、レイノルズ平均ナビエ・ストークス(RANS)方程式を、乱流モデルの一つである標準 k-ε モデルを使用して数値的に計算することで、実験模型周辺の定常流れ場を求めた。計算モデルの基礎方程式となる運動方程式と連続の式を(1)と(2)に記す。

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_m \frac{\partial u_i}{\partial x_m} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} - g_i + \frac{\partial}{\partial x_n} \left( \nu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_n} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

u : 風速(m/s), P: 圧力(Pa),  $\nu_t$ : 乱流拡散係数(m<sup>2</sup>/s), t: 時間(s), g: 重力加速度(m/s<sup>2</sup>), x: 3次元座標(m)

添字 i, m, n は, 3次元座標の方向を示す

降雨粒子および飛沫粒子の到達モデルは, 粒子個々の挙動を解析し, 現実的な到達の再現をおこなうことができると考え, 粒子追跡法を使用し計算をする. 到達過程では, 粒子は抵抗力と重力を受け, 流れ場中を移動すると考える. 粒子が受ける抵抗力の式と粒子個々の運動方程式を式(3)と(4)に記す.

$$F_{D, i} = \frac{1}{2} C_D A_p \rho_f |u_i - v_i|^2 \quad (3)$$

$$m \frac{dv_i}{dt} = F_i - mg_i \left( 1 - \frac{\rho_f}{\rho_p} \right) \quad (4)$$

$m_s$ : 粒子の質量,  $V_s$ : 粒子の体積,  $\rho_f$ : 流体の密度

$C_D$ : 抗力係数,  $A_p$ : 投影面積,  $|u_i - v_i|$ : 相対速度

$g_i$ : 重力,  $F_i$ : 抗力,  $\rho_f$ : 連続相(空気)の密度

粒子の移動距離, 速度, 角速度は式(5)と(6)と(7)に記す.

$$x_i = x_i^0 + v_i \Delta t \quad (5)$$

$$v_i = v_i^0 + \frac{dv_i}{dt} \Delta t \quad (6)$$

$$\omega_i = \omega_i^0 + \frac{d\omega_i}{dt} \Delta t \quad (7)$$

計算は模型実験を再現した条件で実施した. 計算領域は length=10m, width=2.3m, high=5m の空間で実施した(図-3). 流れ場の計算領域では格子間隔0.05mの等間隔格子とした. 境界条件については実験の条件と同様に模型の上部と後部の面を流出面, 左右および下部の面を流体の出入りがない壁面とし, 模型に向かい合う面を流入面としました. 流入面からは風速を入力した. 飛来塩分の粒子追跡では流入面から粒径 20 $\mu$ m~200 $\mu$ m の粒子を 3L/hr のペースで投入し, 飛来塩分の到達実験の再現を行った. 降雨の粒子追跡は, 地表面から高さ 3.7m の地点から 0.3m~0.6m までの粒子を 38mm/hr のペースで発生させ, 模型へ作用させた.

#### 4 実験結果と解析値の比較

模型に対して流体を作用させたときの実験値と解析値の風速を図-3に示します. この結果により模型 A と模型 B とともに解析値は風速の実験値と同様の傾向がつかめており, 精度よく再現できていることがわかる. また, この結果により, 模型の形状の違いによって風況の分布が大きく異なることがわかった. 次に飛来塩分の到達量の実験値と解析値の結果を図-4(左)に示す. この結果を見ると実験値では模型下部と上部で大きく飛沫の到達量が異なっ

おり, 下部の飛沫の到達量が多くなる傾向がみられた. また, 実験値と解析値と比較すると上部は傾向がつかめていないが模型下部においては過小評価となった. これは実験では張り出しの影響により模型下部の風が乱れ, 粒径の小さい飛沫が影響を受けたこと解析値と実験値の誤差である要因だと考えられる. しかし, 全体的に分布傾向はつかめていないと判断する. 最後に降雨の到達量の実験値と解析値の結果を図-4(右)に示す. この結果をより, 解析値は実験値と同様の傾向がつかめており, 再現できていると判断した. また, 模型下部で降雨の到達が少なくなっている. これは張り出しにより降雨が遮断されたことが予測される. 以上より, 示した計算モデルにより, 実験の傾向をつかむことができた. 実際の構造物においても示した計算モデルにより飛来塩分・降雨到達量を予測することができると考える.

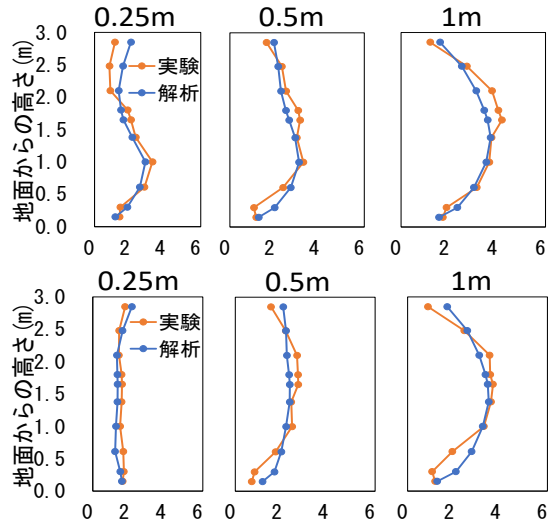


図-4 模型に作用する風速

実験値と解析値 (上: 模型 A, 下: 模型 B)

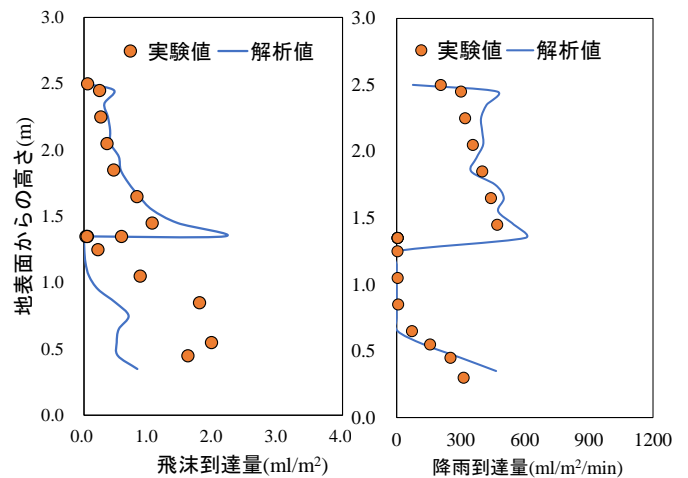


図-5 模型への飛来塩分(右)降雨(左)の到達量

実験値と解析値