

路面から大気空間に供給される凍結防止剤の屋外実験とその輸送解析

環境社会基盤工学専攻 コンクリート研究室：原 良太郎

指導教員：下村 匠

1. はじめに

北海道から東北地方において、路面の凍結を防止することを目的に、凍結防止剤の路面への散布が行われている。凍結防止剤には、一般的に塩化ナトリウムが使用されており、散布された凍結防止剤は、コンクリート構造物の塩害劣化の要因の一つとなるため問題となっている。

路面上に散布された凍結防止剤は、路面上の水分で溶解し、自動車の走行により路面の水分とともに微小な飛沫として大気中に舞い上げられる。その後、大気中の風により輸送されることで、周辺のコンクリート構造物に到達する。これらの物理過程を把握し、構造物表面に到達する凍結防止剤による塩分量を予測することは、構造物の塩害対策の一つとして重要となる。

既往研究では、凍結防止剤による周辺環境への影響を評価するために、いくつかの研究事例が報告されている。例えば、木村ら¹⁾は、凍結防止剤の散布と沿道環境の評価として、自動車の走行により路面から舞い上がった凍結防止剤に含まれる塩分量についての測定を行っている。岩崎ら²⁾は、凍結防止剤による塩分の橋桁各部位への付着量の測定を実施している。奏ら³⁾は、凍結防止剤の飛散を数値シミュレーションにより予測し、その結果を報告している。これらの研究により、大気中へ供給された凍結防止剤の風による輸送過程および構造物への到達過程が明らかになりつつある。しかしながら、凍結防止剤を含んだ飛沫の構造物への到達過程に合わせて、その境界条件となる路面から大気中のへ供給過程を把握することは重要であるが、その報告事例は少ないのが現状である。

本研究では、路面上の水分の塩分濃度を推定す

るために屋内実験と数値計算を行った。また、自動車の走行によって路面から大気へ供給される飛沫量とその粒径に関する屋外実験を行った。さらに、飛沫粒子の輸送・到達過程の数値シミュレーションを実施し、構造物への到達過程について検討した。

2. 路面の塩分濃度

2.1 路面上の水分の塩分濃度の推定

路面の水分の塩分濃度の時間的な変動を確認するために、屋内実験および予測計算を実施した。

2.2 屋内実験方法および実験ケース

図-1 屋内実験の概要を示す。図に示すように、屋内実験はトレイ内に作製した氷板に凍結防止剤を散布し、規定時間ごとに氷の融解と凍結防止剤の溶解によって発生した塩溶液の塩分濃度を測定した。

実験ケースを表-1に示す。ケース1~4は田島ら⁴⁾の実験結果を用いた。ケース5~7は新潟県の環境を想定して今回新規に実施したものである。

2.3 数値計算モデル

数値計算は既往研究⁵⁾を参考に計算プログラムを作成し、計算結果を実験結果と比較した。図-2に計算モデルの概要を示す。図に示すように、モデルで凍結防止剤の溶解については、球体で扱い下半球の表面積が塩溶液と接触し、溶解としている。また、氷の融解については凍結防止剤を中心に半球体状で拡大すると考える。

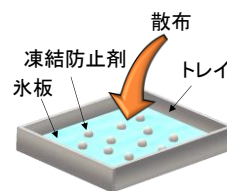


表-1 実験ケース

実験ケース	室温(°C)	時間(分)
ケース1	-10°C	10~360分
ケース2	-7°C	
ケース3	-4°C	
ケース4	-1°C	
ケース5	2°C	
ケース6	3°C	
ケース7	4°C	

図-1 屋内実験概要

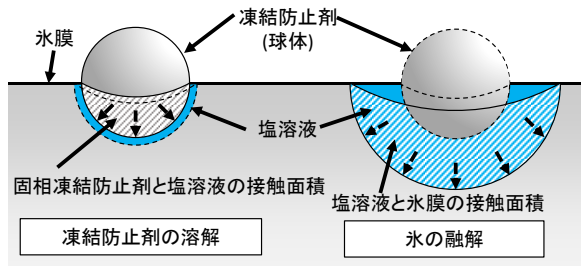


図-2 モデルの概念図

2.4 結果および考察

図-3 に実験結果および計算結果の比較を示す。図の丸印は実験結果であり、実線は計算結果である。これらの結果から、塩分濃度は凍結防止剤散布後 120 分経過後にはほぼ平衡状態となる。気温が $-1\sim-10^{\circ}\text{C}$ では気温に応じて $3.0\sim 13.6\%$ と変化し、気温が $2\sim 4^{\circ}\text{C}$ の場合は約 3% 程度なることが確認された。さらに、予測計算によって実験による塩分濃度の経時変化をおおむね再現できることが示された。

3. 自動車の走行時に発生する飛沫粒子の実験

3.1 実験施設および実験方法

実験は、長岡技術科学大学の敷地内のアスファルト舗装された道路に図-4 のような設備を配置して実施した。凍結防止剤は、路面の水分によって溶解したものが大気中に舞い上がるため、図に示すような散水ホースにより路面に散水を行った。散水は、距離 20m の範囲で路面全体の表面水膜が一定となるように行った。大気中に舞い上がった飛沫は、風によって輸送されるため、図のように送風機 4 台を設置し、高さ 2m 程度までの範囲で自動車の走行方向と垂直な方向に風を作用させた。

実験に使用した自動車は、車長 4.6m 、車幅 1.8m 、車高 1.66m であり、スタットレスタイヤ(幅: 約 0.2m 、外径: 0.652m) を用いた。自動車の走行は、設定速度まで加速するための距離を 200m とした。

3.2 測定方法

(1) 測定項目

実験の測定項目は、路面から大気中への供給さ

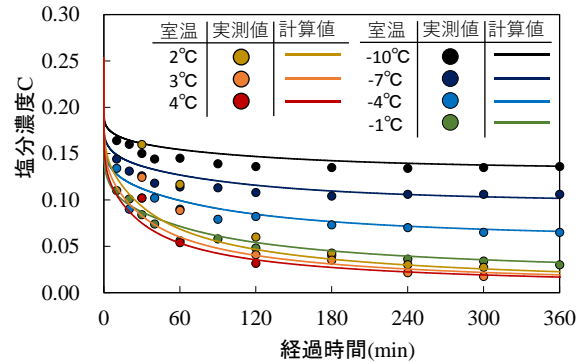


図-3 実験結果と計算結果の比較

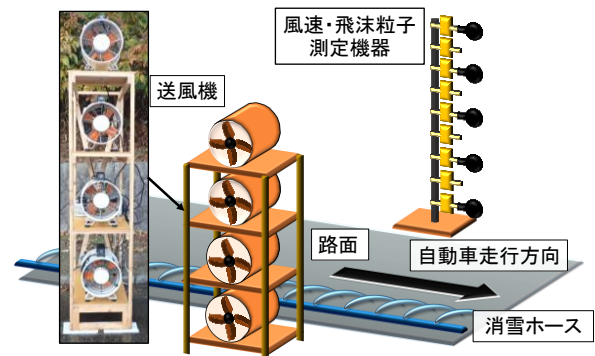


図-4 実験施設

れる飛沫状の凍結防止剤の発生量に関する 5 つの項目とした。

- 路面の表面水膜厚
- 自動車の走行速度
- 路面上の風速
- 飛沫量の鉛直分布
- 飛沫粒子の粒径分布

路面から発生する飛沫量と粒径分布は、高さ方向に変化するため、鉛直方向の飛沫量と粒径の測定を行った。各項目の測定方法を以下に示す。

(2) 路面の表面水膜厚

路面の表面水膜厚は、吸水スポンジ(カレント製)を用いて、路面上の水分を吸水し、その水分量から表面水膜厚の算出を行った。実際には、吸水スポンジ(面積 54m^2)を路面に押し当て路面上の水を吸水させ、その後、水分の重量を測定した。表面水膜厚は、採取した水分の重量を体積に変換して算出した。

(3) 自動車の走行速度

自動車の走行速度は、デジタルビデオカメラに

よって撮影した画像とスピードガンを用いて測定を行った。画像からの走行速度の測定は、路面に4m 間隔で目印を設置し、その位置を通過する自動車の時刻から算出した。算出した速度は、スピードガンで測定した速度と比較し、その確認を行った。

(4) 路面上の風速

路面上の風速は、風速計(プロペラ式)を鉛直方向に設置することで測定を行った。測定時間間隔は1 秒間隔であり、データロガーを用いてデータの収集を行った。

(5) 飛沫量と飛沫粒子の粒径分布

飛沫量および飛沫粒子の粒径は、感水試験紙を用いて、大気中に供給された飛沫を採取し、それを画像解析することで算出した。飛沫の採取に用いた感水試験紙は、Syngenta 製の寸法 76mm×52mm である。この試験紙は、大気中の飛沫粒子の粒径 50 μ m 程度までの水分に反応するものであり、水分が表面に到達すると痕跡が残る仕組みになっている。痕跡は、デジタルカメラ(CanonIXY650, 2020 万画素)で撮影し、構築した画像解析システムにより単位面積当たりの飛沫粒子の到達個数と粒径の測定を行った。

画像解析システムは、プログラム言語 C++とOpecCV を組み合わせたプログラムで構築した。このシステムは、撮影した画像を2 値化し、飛沫の痕跡とそれ以外の部分に区別を行い、その後、各粒子の痕跡を円形として抽出することで、その寸法(直径)と座標を抽出する仕組みとなっている。感水試験紙上で測定した飛沫粒子の痕跡の大きさから大気中の飛沫粒子の粒径の変換には、角川ら⁶⁾を参考に式(1)により変換を行った。

$$D_d = 1.0334D_s^{0.8787} \quad (1)$$

ここで、 D_d は大気中の飛沫粒子の直径(μ m)、 D_s は感水試験紙上の飛沫粒子の痕跡の直径(μ m)である。飛沫量への変換は、大気中の飛沫粒子を球形と仮定し、画像解析から得られた飛沫粒子の直

径から体積を算出した。

(6) 計測機器の配置および測定範囲

各測定機器の配置を図-5 に示す。飛沫粒子の採取するための感水試験紙と風速計は、自動車の車輪通過位置から 2.0m の位置に設置した。感水試験紙は、地表面から高さ 2.25m までの範囲に 0.25m 間隔で 9 点を設置した。風速計は、高さ 0.25, 0.75, 1.25, 1.75, 2.25m の 5 点に設置した。路面の表面水膜厚は、走行距離 4.0m の範囲で 12 点を測定した。

3.4 実験ケース

実験ケースは、路面上の風速を 2.0m/s, 4.0m/s の 2 種類、走行速度 30km/h, 40km/h, 50km/h の 3 種類の計 6 ケースである。1 ケースあたり 3 回の測定を実施した。路面の表面水膜厚は 0.5~1mm となるように設定した。

3.5 実験結果および考察

(1) 飛沫量と飛沫粒径の測定方法の妥当性の検証

構築した画像解析システムの測定結果の妥当性を検証するために、飛沫粒径の画像解析結果と実測結果との比較を行った。図-6 は、画像解析結果とマイクロスコープを用いて実測した結果を比較したものである。図の白色の印は、感水試験紙に到達した飛沫粒子の痕跡を測定とした結果であり、黒色印は顕微鏡用スケール(太陽株式会

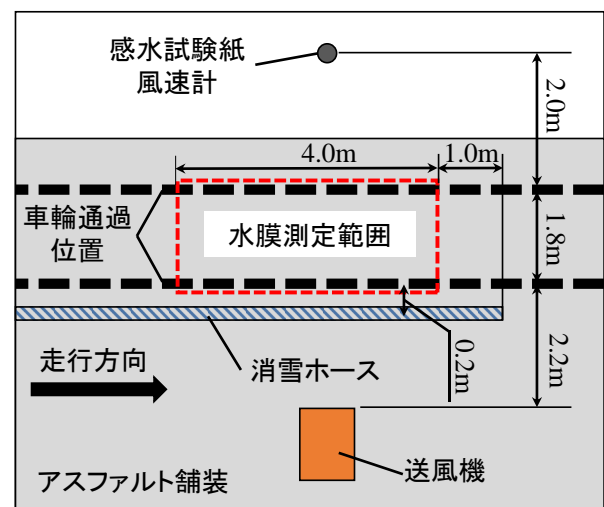


図-5 測定機器の配置と測定範囲

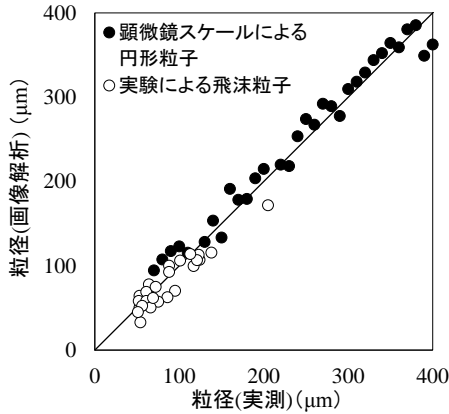


図-6 粒子粒径の画像解析と実測結果の比較

社製)による円形のプリントを測定した結果である。

図に示すように、画像解析で測定した飛沫粒子の粒径は、若干のばらつきが見られるが実測による結果と一致していることがわかる。両者の値にばらつきが生じる原因は、今回の解析方法がピクセル数から粒径を測定しているためであり、1ピクセル以下の大きさの範囲で誤差が生じることとなる。画像解析に使用した画像の1ピクセルの寸法は30 μm 程度である。以上より、一定の測定誤差が生じているが、画像解析により飛沫粒子の粒径を測定できることがわかった。

(2) 大気中に供給された飛沫量

図-7は、風速4.0m/sの場合の走行速度30と50km/hの条件の感水試験紙に到達した飛沫粒子の痕跡を示した実験結果である。図の黒色の点が到達した飛沫粒子の痕跡である。図より、感水試験紙に到達した飛沫粒子は、自動車の走行速度50km/hより、走行速度30km/hの条件のほうが減少している傾向が見られる。感水試験紙の設置高さによる比較では、地表面からの高さ0.25mで飛沫粒子の到達数が最も多くなっており、高さが低い位置で到達数が多くなる傾向であった。また、高さ2.25mの位置にも、飛沫粒子が到達しており、走行した自動車の高さ1.66mより高い位置まで飛沫粒子が舞い上がっていることが確認された。

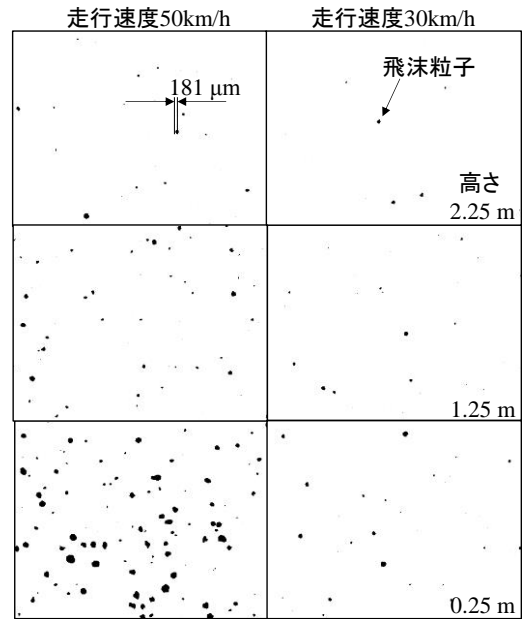


図-7 感水試験紙に到達した飛沫粒子の痕跡

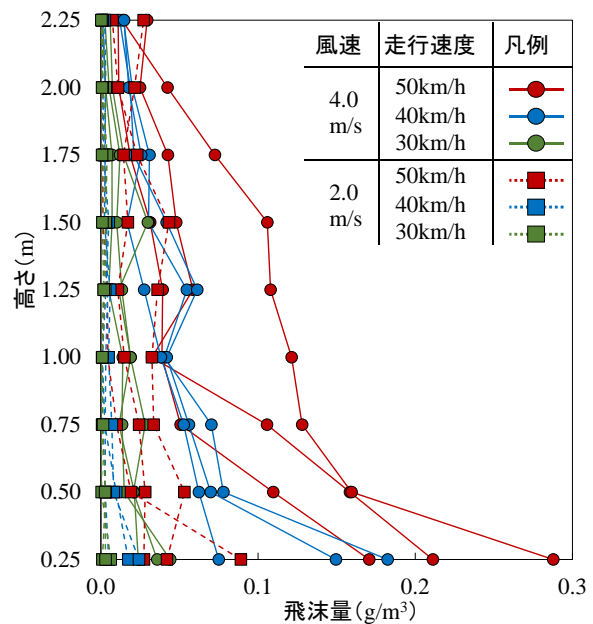


図-8 飛沫量の鉛直分布の実験結果

(3) 大気中に供給された飛沫量

大気中に供給された飛沫量の鉛直分布を図-8に示す。図の飛沫量は、感水試験紙に到達した飛沫量を奥行き1m当りの量として変換した値である。図に示すように、大気中に供給される飛沫量は、路面上の風速4.0m/sの条件で大きくなるとともに、自動車の走行速度の増加に伴い、その量も大きくなる傾向が見られる。また、風速

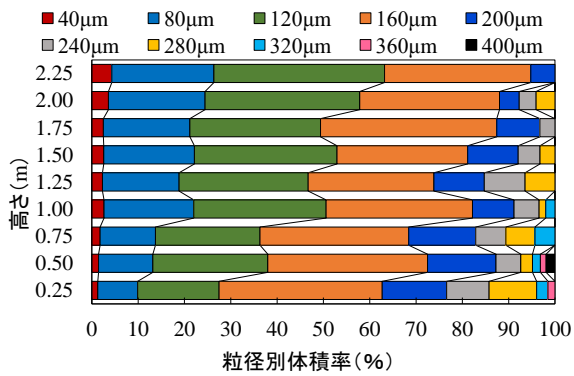


図-9 飛沫粒子の到達体積率(粒径分布)

4.0m/s のケースでは、地表面から離れるに応じて減少する結果となっている。これらの結果より、実験結果の飛沫量にばらつきが見られるが、路面上の風速および自動車の走行速度、地表面からの高さに応じて変化していることがわかった。

(4) 大気中に供給された飛沫粒子の粒径分布

図-9 は、風速 4.0m/s の走行速度 50km/h の条件における飛沫粒子の粒径別の到達体積率である。図の到達体積率は、感水試験紙に到達した各粒径を体積に変換し、各高さで到達した全飛沫量との割合を示した値である。

図から、到達した飛沫粒子の粒径別体積率は各高さで変化しており、高い位置のほうが小さい粒径が占める体積の割合が大きくなっていることがわかる。粒径別の体積率は、粒径 200 μm 以下の飛沫粒子が全体の 8~9 割程度を占める結果となっている。これより、普通自動車による走行では、路面から大気中に供給される飛沫粒子は 200 μm 程度までの粒径の割合が大きいことがわかった。また、200 μm 以下の飛沫粒径の体積率は走行速度 50km/h と 40km/h を比較した結果でほぼ同様の傾向であった。

(5) 自動車の走行による飛沫の供給量の定式化

実験結果を整理することで、自動車の走行による大気中への飛沫の供給量の定式化を行った。実験により、大気中への供給量は、自動車の走行速度、路面上の風速、地表面からの高さの影響が大きいことが明らかにされたため、これらの影響因

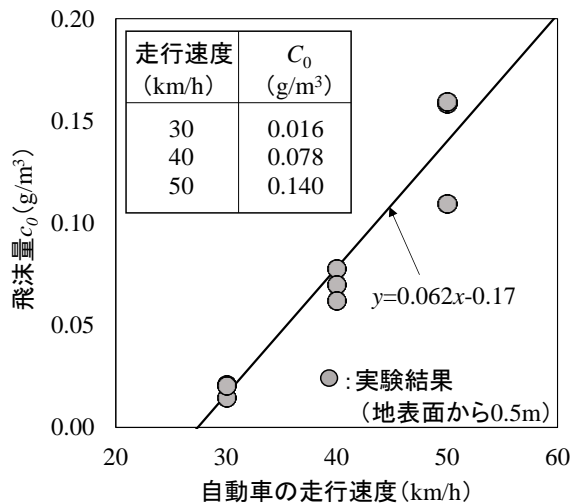


図-10 飛沫量と走行速度の関係

子を変数とした飛沫の発生量の算定式を式(2)のように整理した。

$$c_v = c_0 \cdot \alpha \cdot u_w^2 \cdot \exp\{-k(h - h_0)\} \quad (2)$$

ここで、 c_v は大気中に供給される飛沫量 (g/m^3)、 α は風速の補正係数($=0.625$)(s^2/m^2)、 u_w は路面上の風速 (m/s)、 k は鉛直方向の飛沫量の減衰係数 ($=1.10$)($1/\text{m}$)、 h は地表面からの高さ (m)、 h_0 は飛沫の発生量 c_0 を求めた基準高さ ($=0.5$)(m)である。

地表面上の飛沫の発生量 c_0 (g/m^3)は、自動車の走行速度に関係していると考えられるため、実験結果から走行速度と飛沫の発生量の関係を図-10のように整理した。図の横軸は自動車の走行速度であり、縦軸は高さ 0.5m 位置の飛沫粒子の発生量である。飛沫粒子の発生量は高さが低い位置では、実験結果のばらつきが大きい傾向があるため、安定して飛沫量を測定できる高さ 0.5m の位置の結果を整理した。

図-11 は、発生量の算定式を用いて飛沫量を算出した結果である。図の横軸の括弧の値は、塩化物イオン量(mg/m^3)に変換したものである。飛沫量から塩化物イオン量への変換は、路面の水分に含まれる塩分濃度を 3%と仮定して行った。図の実験結果は、3 回の測定結果の平均値である。図に示すように、算定式の結果は、地表面に近い高さ 0.25m および 1.50 付近で差が見られるが、自

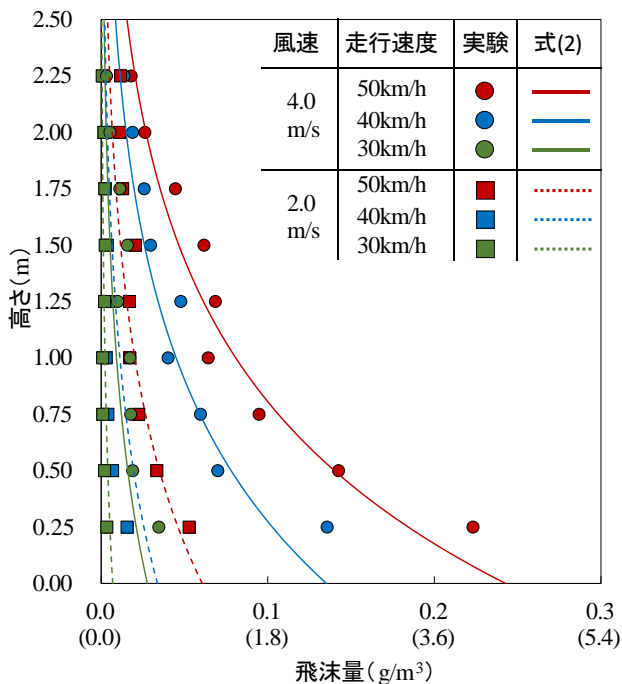


図-11 飛沫量の算定結果と実験結果の比較

自動車の走行速度および路面上の風の影響に応じた飛沫量を概ね再現できている。この結果から、路面の水分に含まれる凍結防止剤(塩分)量がわかれば、自動車の走行によって大気中に供給される塩化物イオン量が予測できることがわかった。

4. 凍結防止剤のコンクリート構造物への影響

4.1 飛沫粒子の輸送・到達量の予測

路面から発生した凍結防止剤によるコンクリート構造物への影響を評価するために、路面から大気中へ供給された飛沫粒子の大気中の輸送と構造物への到達過程の数値シミュレーションを実施した。

4.2 計算モデル

本計算は、以下の a)~c)の物理過程を組み合わせた計算モデルを用いた。

- 自動車の走行時の凍結防止剤を含んだ飛沫粒子の大気中への供給過程(本実験結果)
- 大気空間における周辺地形と構造物形状を含めた3次元空間での風況
- 路面から供給された飛沫粒子の風による輸送過程と構造物表面への到達過程

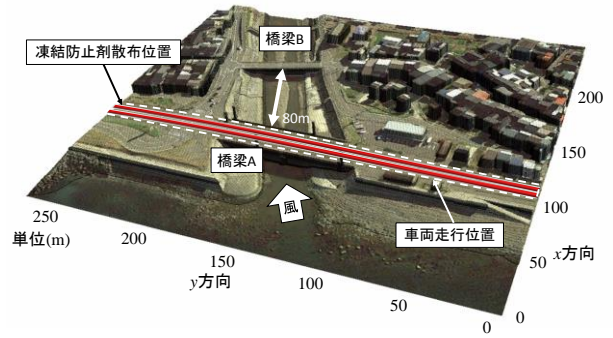


図-12 計算領域

物理過程 a)は、自動車の走行による本実験結果から求めた算定式を用いて計算を行った。物理過程 b)および c)は、中村ら⁷⁾を参考に風況と飛沫粒子の輸送・到達過程を統合した計算を実施することとした。

大気中の風況の計算は、3次元の連続式と Naver-Stocs 方程式を用いた計算モデルである。飛沫粒子の輸送過程と構造物への到達過程は、飛沫粒子を水分・塩分を含んだ球形状の粒子と仮定し、その粒子に作用する風の抗力、飛沫粒子の自重、飛沫粒子の慣性力の釣り合いで計算を行った。

4.3 計算条件および計算ケース

(1) 計算条件および境界条件

凍結防止剤のコンクリート構造物への影響を評価するために、実際に凍結防止剤が散布されている実橋梁を対象に計算を行った。対象としたコンクリート構造物は、新潟県に位置する橋梁 A とその風下側に位置する橋梁 B である。橋梁 A では、凍結防止剤の散布が実施されており、橋梁 A から B 方向に強風が吹き付けるような場所である。

計算領域は、図-12 のような x 方向 250m, y 方向 270m, z 方向 20m の 3 次元空間である。計算格子は水平(x および y)方向が 0.5m, 鉛直(z)方向が 0.25m である。図の橋梁 A の赤色の実線部分が車両の走行位置である。飛沫の発生量は、本実験で得られた算定式(2)の鉛直分布を車両走行位置に設定した。発生する飛沫粒径は直径 40, 80,

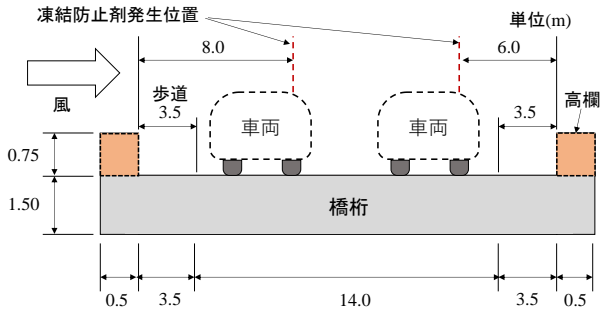


図-13 橋梁 A の橋桁形状

120, 160, 200 μm とした. 大気中の飛沫粒子の拡散係数は, 風況の計算で求められた風の乱れに応じた乱流拡散係数を設定した.

風況の計算モデルに設定する境界条件は, 橋梁 A 周辺で実施された既往研究⁸⁾による風速の観測結果を再現するように, x 方向の風速 $u_0=10.1\text{m/s}$, y 方向の風速 $v_0=4.1\text{m/s}$ を設定した. 計算境界に設定した風速の鉛直分布はべき剰則である.

(2) 計算ケース

計算ケースは, 橋梁形状を変化させた図-13のような2 ケースを実施した. Case1 は現況の橋桁形状を設定した条件であり, 橋桁には高さ 0.75m の高欄が設置されている. Case2 は橋桁の高欄がない場合の条件であり, 転落防止のための手すり等は考慮しないこととした.

4.4 計算結果および考察

(1) 橋梁 A 周辺における風速分布

対象とした計算領域において風況の計算を実施し, その結果を既往研究⁶⁾による観測結果と比較を行った. 図-14 に, 風速の計算結果と観測結果を比較したものを示す. 図の丸印で示す観測結果は, 橋梁 A 周辺の風速の測定結果であり, 観測期間が 2017 年 3 月 3 日 13:00~15:00 である. 図に示すように, 橋桁上の観測点 No.5 で, 風速の計算結果は若干過小となっている部分が見られるが, その他の観測点では風速の観測結果を再現できていることがわかる.

(2) 飛沫粒子の輸送と構造物表面への到達過程

図-15 は, Case1 における橋梁 A から発生し

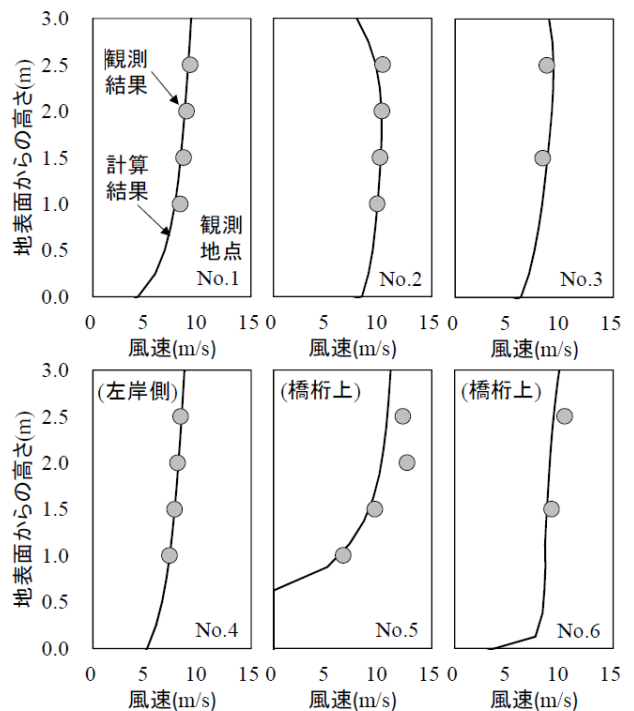
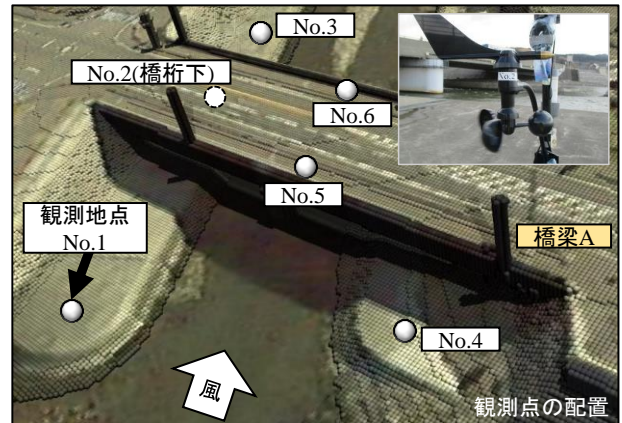


図-14 風速の計算結果と観測結果比較(Case1)

た飛沫粒子の輸送・到達過程を示した計算結果である. 飛沫粒径は 120 μm である. 図より, 橋梁 A を通過する車両から発生した飛沫粒子は, 飛沫発生から 5 秒後(計算時間 5 秒後)に橋桁上で一度上空へ舞い上がり, その後, 橋梁 B の方向へ輸送されていることがわかる. 計算時間 35 秒後には, 風下側に設置されている橋梁 B の地覆部分に飛沫粒子が到達している. この結果から, 橋桁上で発生した飛沫が, 大気中の風によって輸送され, 周辺に設置されている構造物表面に到達していることが示された.

(3) 橋桁形状の違いと飛沫粒子の到達量の関係

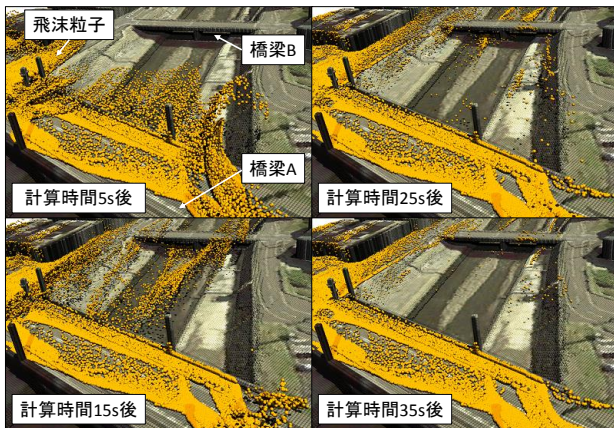


図-15 飛沫粒子の輸送・到達過程(Case1)

橋梁 B に到達した飛沫粒子の計算結果を図-16 に示す。図に示すように、橋梁 B に到達する飛沫量は、橋梁 A の形状に応じて変化しており、Case1 の高欄が設置されている条件のほうが、橋梁 B に到達する飛沫量が少なくなっている。これは、高欄背後に形成された風の渦により橋桁上の飛沫が上空へ舞い上がり、その後、橋梁 B の方向とは異なる方向に輸送されるためである。この結果から、飛沫の発生位置となる橋桁の形状に応じて、周辺の構造物に到達する飛沫量が変化することが明らかになった。

5. 結論

路面上の水分の塩分濃度については、3.0%程度となることが確認された。さらに、予測計算によって実験による塩分濃度の経時変化をおおむね再現できることが示された。また、自動車の走行により路面から大気中に供給される飛沫量は、鉛直方向に減衰する指数分布で整理できることが実験結果から示された。これらをもとに数値シミュレーションを実施した結果、橋桁上で路面から大気中に供給された飛沫粒子は、橋桁形状の影響を受けて周辺の構造物表面に到達していることが明らかになった。

参考文献

1) 木村恵子, 曾根真里, 並河良治, 桑原正明, 角湯克典: 凍結防止剤散布と沿道環境, 国土技術政策総合研究所資料, No.412, 128.p, 2007.7

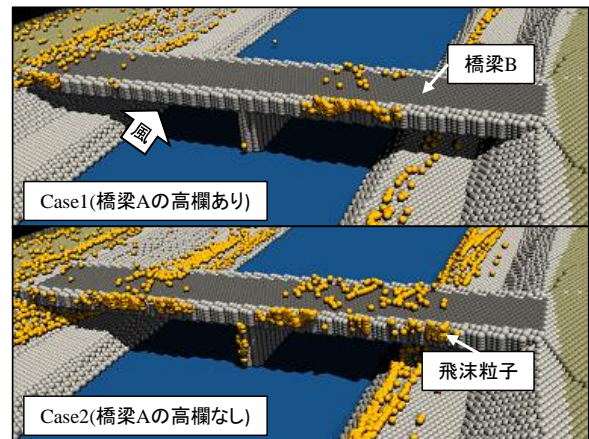


図-16 橋梁 B にと到達する飛沫粒子の計算結果

- 2) 岩崎英治, 永藤壽宮, 湯浅 昭, 西 剛広: 凍結防止剤の飛散と鋼橋の腐食, 構造工学論文集, Vol.58A, pp.655-667, 2012.
- 3) 秦 聡一郎, 白土博通・野口恭平・八木知己: 車両走行による凍結防止剤の飛散特性, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.73, No.1, pp.195-205, 2017
- 4) 田島功章, 吉川進: 凍結防止剤の低減に向けた基礎調査, 国土交通省北陸地方整備局
- 5) 藤本明宏, 山田慎也, 田中俊輔, 高橋尚人, 武市靖: 通過車両を考慮した凍結防止剤事後散布後の路面すべり抵抗推定法の構築と検証, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vol.71, No.2, pp.81-96, 2015
- 6) 角川 修, 深山大介, 荒木琢也: 感水紙を用いた茶園における農薬散布時のドリフトの評価, 茶業研究報告, No.106, pp.21-38, 2008.
- 7) 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数値解析, 日本材料学会コンクリート構造物の補強, 補修, アップグレード論文報告集, 第 18 巻, pp.323-328, 2018.10
- 8) 中村文則, 大原涼平, 井野裕輝, 山口貴幸, 下村匠: 構造物周辺の地形・風況・飛来塩分の詳細調査とその予測技術の基礎的研究, 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 17 巻, pp.615-620, 2017.10