論文 コンクリート橋桁表面への飛来塩分粒子の到達過程に関する模型実 験とその再現解析

中村 文則*1・山口 貴幸*2・井向 日向*3・下村 匠*4

要旨:本研究では,風と飛来塩分粒子の作用を調整できる実験施設を利用し,海岸近傍に設置された構造物 を想定した条件で室内実験を行い,構造物表面に到達する飛来塩分粒子の到達量と粒径について検討を行っ た。さらに,風と飛来塩分粒子を統合した数値シミュレーションを実施した。その結果,海岸近傍に設置さ れた構造物では各部位で飛来塩分粒子の到達粒径が大きく異なっていることが明らかになった。さらに,飛 来塩分粒子の代表粒径を数値モデルに設定する方法では,到達塩分量の全体的な傾向はおおむね再現できる が,大きい粒径が到達している部分で局所的に再現性が低下する傾向があることが示された。 キーワード:塩害,飛来塩分,表面塩分量,風洞実験,飛来塩分シミュレーション

1. はじめに

コンクリート構造物内部の塩分浸透過程および鋼材の 劣化過程を正確に予測するためには、その境界条件とな る構造物表面に到達する飛来塩分量を予測する必要があ る。特に、海岸近傍に設置された構造物では、飛来塩分 の到達量が大きいため、構造物に作用する塩分量を事前 に予測することが重要である。

既往研究^{1),2),3)}では,数値シミュレーションを用いて, コンクリート橋桁表面に到達する飛来塩分量を予測した 研究事例が報告されており,橋桁形状に応じた到達塩分 量を予測できることが明らかにされている。その一方で, このような数値シミュレーションによる方法を用いて, 信頼できる計算結果を得るためには,設定する計算パラ メータを正確に与えることが重要である。例えば,構造 物に到達する飛来塩分量の計算であれば,計算モデルに 設定する飛来塩分の発生量(計算境界での塩分量)と飛来 塩分粒子の粒径となる。構造物表面の飛来塩分量につい ては,山下ら⁴⁾が海岸近傍に設置された実構造物を対象 に現地観測を実施しているとともに,いくつかの結果が 報告されている。

その一方で、コンクリート構造物に到達した飛来塩分 粒子の粒径までを測定した事例は非常に少なく、これま での知見では十分に把握できていないのが現状である。 また、模型実験によって構造物表面に到達する飛来塩分 粒子の粒径を測定している研究事例⁵⁰はあるが、内陸部 に設置された鋼構造物を対象とした実験がほとんどであ る。海岸近傍に設置されているような構造物を想定して、 飛来塩分粒子の粒径を調整して実験を実施した例は報告 されていないのが現状である。なお、飛来塩分粒子の粒 径を調整・測定していない実験事例も多い。

以上より, コンクリート構造物表面に到達する塩分量 を数値シミュレーションで予測する方法は確立されてい るが,その設定条件となる飛来塩分粒子の粒径について は十分に明らかにされていないのが現状である。コンク リート構造物表面に到達する飛来塩分量にあわせて,そ の粒径を詳細に測定できれば,構造物の塩害劣化予測解 析の境界条件の高精度化に繋がる。

本研究では、風と飛来塩分粒子の作用を調整できる実 験施設を利用し、海岸近傍に設置された構造物を想定し た条件で室内実験を行い、構造物表面に到達する飛来塩 分粒子の到達量と粒径について検討を行った。さらに、 風と飛来塩分粒子を統合した数値シミュレーションを実 施し、その設定条件による影響についても検討した。

2. 構造物表面に到達する飛来塩分粒子の模型実験

2.1 実験施設および実験模型

(1) 実験施設

実験施設は、図-1のような長岡技術科学大学に設置 されている塩害環境作用を再現できる風洞実験施設を用 いた。施設の寸法は、長さ9.0m、幅2.0m、高さ2.0mで あり、飛来塩分および風を同時に作用できる施設である。 施設内部は、図のように風と飛来塩分が循環する構造で あり、中央部が測定範囲となっている。測定範囲の断面 寸法は幅0.9m、高さ2.0mである。風を制御する送風機 は、測定範囲の風下側に設置されており、断面内の風速 がほぼ一定となるように調整を行っている。測定範囲の 風上側には、風洞内の風の流れを整える整流板(新日本フ エザーコア製 V-8-75)が設置されており、幅0.9m、高さ

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科環境社会工学専攻助教 博(工) (正会員)
*2 長岡技術科学大学 技術支援センター技術職員 修(工) (正会員)
*3 長岡技術科学大学大学院 工学研究科技術科学イノベーション専攻 学(工)
*4 長岡技術科学大学大学院 工学研究科環境社会工学専攻教授 博(工) (正会員)



図-3 実験模型の設置状況

2.0m, 厚さ 0.3m, メッシュ形状が 8mm 間隔の 6 角形構 造のものを使用した。飛来塩分の発生装置は,整流板の 風上側に高さ 0.85m と 1.75m の 2 箇所に設置した。この 発生装置は, 圧力(0.3kPa)を作用させた空気と塩水を同時 に噴射させることで,ノズルから平均粒径 100µm 程度の 飛来塩分粒子を扇形状に発生させるものである。飛来塩 分粒子の粒径は,海岸から 50m 程度の位置に設置されて いる実構造物周辺の飛来塩分粒子の粒径の現地観測結果 ³⁾を参考に設定した。

(2) 実験模型

設置した実験模型は、図-2のような長さ1.0m,幅0.3m, 高さ0.24mのT桁形状の模型である。実験模型は、整流 板(境界位置)から3.0m,高さ0.94mの位置に、図-3の ように風洞の断面で一様となるように材質の異なる3体 を設置した。配置は中央にコンクリート製、その両端に 発泡スチロール製の模型とした。

2.2 実験方法

測定項目は,風速,模型表面に到達する飛来塩分粒子の到達状況および粒径,到達した飛来塩分量である。風



速の測定は、熱線式風速計を施設内に設置し、1 秒間隔 で5分間の測定を行い、その平均値を整理した。風速の 測定位置は、図-4のような模型周辺の50点である。

飛来塩分粒子の到達状況は,文献³⁾を参考に感水試験 紙(Syngenta 製)を用いて測定した。この感水試験紙は, 粒径 50µm までの水滴を測定できるものであり,試験紙 表面に水滴が到達した場合に,痕跡が残る仕組みになっ ている。感水試験紙の寸法は,縦 38mm,横 52mm であ り,図-5のように模型表面に 30 点を設置した。感水試 験紙の暴露時間は 10 分間である。暴露後の試験紙は表面 をデジタルカメラ(Canon IXY650, 2020 万画素)で撮影し, 各測点に到達した飛来塩分粒子について確認を行った。

模型表面に到達する飛来塩分量は、ガーゼ法を用いて 行った。飛来塩分の採取に使用した塩分の捕捉器は、縦 4cm、横5cmの受風口が設置されているアクリル製のプ レートと受風口がないプレートにガーゼを挟んだもので ある。捕捉器全体の寸法は縦5cm、幅7cmである。捕捉 器の寸法は、実験模型の各壁面の寸法に対して比較的大 きいが、ガーゼ面全体に飛来塩分粒子がほぼ均一な分布 で到達していることを、感水試験紙により事前に確認し ている。実験では、捕捉器を模型表面に設置し、60分間 の暴露を行った。設置位置は、感水試験紙と同様の30 点である。暴露後は蒸留水10mlにガーゼを投入し、そ の溶液の塩化物イオン量を塩化物イオンメータ (HORIBA 製)により測定した。測定した塩化物イオン量



は、単位時間および面積当りの量に変換を行い、実験結 果として整理した。

2.3 実験条件

実験は、模型を設置した状態で、境界(整流板)からの 距離が 2.5m の位置で風速が 3.0m/s になる条件で実施し た。飛来塩分の発生は、塩分濃度 3%の溶液を連続的に 噴霧する条件である。ただし、飛来塩分の噴霧は到達塩 分量の測定時だけで行い、風速の測定時には風のみを送 風させた。

2.4 実験結果および考察

(1) 橋桁周辺の風速

橋桁周辺の風速の測定結果を図-6 に示す。図の風速 は,橋桁周辺の各高さにおける風速を整理した値である。 図に示すように,風速は大きく2つの傾向に分かれてお り,橋桁近傍の高さ97,104,121cmでは風速が小さく, それ以外の橋桁から離れた測定点では風速が4~5m/s程 度であった。橋桁下部の主桁間に位置する高さ97 および 104cmの測定結果では,ほとんどの測点で風速1.0m/s以 下となっている。この結果より,橋桁に吹き付ける風は, 橋桁下部の主桁の形状に応じて大きく減衰する傾向があ り,既往研究²⁾の知見と同様の結果が得られた。

(2) 橋桁各部位に到達する飛来塩分粒子の状況

橋桁各部位に到達した飛来塩分粒子の到達状況を整理 した結果を図-7 に示す。図の黒色の部分が飛来塩分の 到達した痕跡である。図に示すように、橋桁の風上側の 壁面となる測点No.1と4で比較大きい粒径が到達してい る傾向が見られる。測点No.4 に隣接するNo.5 では、飛 来塩分粒子はほとんど到達していない状況である。橋桁 下部の主桁部では、風下側に位置する測点No.16(第5主 桁部)で飛来塩分粒子の到達粒子数が多くなっている。到 達粒子数は、下向の測点No.17 より風上向のNo.16 のほ うが多くなる傾向があり、粒径 50μm 以上の大きさの粒 子が到達している状況であった。この結果より、橋桁表 面の各部位で到達する飛来塩分粒子の粒径が大きく異な ることがわかった。







(3) 風上側壁面に到達した飛来塩分粒子の粒径分布

感水試験紙に到達した飛来塩分粒子の痕跡から,壁面 に到達している飛来塩分粒子の粒径別の到達体積率につ いて推定を行った。図-8は、測点 No.1~4の感水試験 紙に到達した粒径の到達体積率を整理した結果である。 到達体積率は、感水試験紙に到達した全粒径の飛来塩分 粒子の体積に対する各粒径が占める体積の割合である。 感水試験紙の痕跡から大気中の粒子の粒径への変換は、 文献ら³⁾を参考に画像解析で実施した。図に示すように、 到達している飛来塩分粒子は、111~140μm 程度までの



割合が大きく, 測点 No.3 以外では同様の傾向で変化して いることがわかる。 測点 No.3 では, 他の測点と比較して 粒径 51~80µm のような小さい粒径の到達率が大きく なっている傾向が見られる。これは, 測点 No.3 の位置が 主桁部のつけ根の位置であり, 壁面に吹きつける風が小 さくなっているためであると考えられる。

(4) 橋桁各部位の到達塩分量

感水試験紙による飛来塩分粒子の到達状況の測定では, 粒径 50µm 以下の粒子の到達状況を評価することができ ないため,同様の位置でガーゼ法による到達塩分量の測 定を実施した。図-9 は橋桁の各部位に到達した飛来塩 分量の実験結果である。図より,到達塩分量は橋桁の各 部位で一定ではなく,表面全体で変動していることがわ かる。到達塩分量は,測点 No.3 を除けば,風が直接作用 する測点 No.1~4 で大きくなっており,感水試験紙で測 定した結果と同様の傾向である。橋桁上部の測点 No.22 ~30 では,風下側に向かって到達塩分量が増加する傾向 が見られる。

橋桁下部では、到達塩分量は風下側の第 3~5 主桁の No.11, No.13, No.16 で大きくなっており、この傾向は 山下ら⁴⁾が海岸から 100m 程度の位置で実施した実橋梁 の現地観測結果と一致する傾向である。

3. 数値シミュレーションによる塩分粒子の到達過程 3.1 計算モデル

計算モデルは,文献³⁾を参考に構造物周辺の風況と飛 来塩分粒子の輸送過程および構造物表面への到達過程を 統合して評価できるものである。風況の計算は,連続式



図-10 計算領域および境界条件

と Navier-Stokes 方程式を用いたモデルであり,基礎方程 式の解法は差分法である。飛来塩分の輸送および到達過 程は,大気中の飛来塩分粒子に作用する力の釣り合いを モデル化して計算を行った。粒子に作用する力は,以下 のような項目を対象とした。

a) 風によって飛来塩分粒子が受ける抗力

b) 飛来塩分粒子の自重によって作用する力

c) 飛来塩分粒子が持つ慣性力

飛来塩分粒子に作用する風速の抗力は、粒子の中心か らその周辺の12点の風速の計算結果から、粒子の位置と 風速の摘出位置までの距離で重み付けを行い、それを平 均して算出した。

飛来塩分粒子の移動距離は式(1)で計算を行った。

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

$$y_{p(t+\Delta t)} = y_{p(t)} + v_p \cdot \Delta t + R_v \tag{1}$$

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

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, w_s は飛来塩分粒子の沈降速度である.大気中での飛来塩 分粒子の拡散は、拡散項 R_x , R_y , R_z の式(2)で計算した。

$$R_{x} = R_{y} = R_{z} = \sqrt{24 \cdot K \cdot \Delta t} \cdot \{0.5 - R(0)\}$$
(2)

ここで, *R*(0)は 0~1 までの乱数である. 拡散係数 *K*(m²/s) は,風の計算から求められた乱流拡散係数 v₁を設定した。 3.3 計算領域および計算条件

(1) 風況の計算

風況の計算領域は,模型実験を再現した図-10のよう な長さ2.5m,高さ2.0mの2次元空間である。模型実験 では断面方向に橋桁模型の形状が一定であるため,風の 計算は2次元空間とした。計算格子間隔は,水平方向お よび鉛直方向で0.005m(5mm)間隔である。計算領域の境 界条件は,風上側を風の流入境界,風下側を自由流出境 界,その他の面を壁面境界とした。流入境界に設定した 風速は,実験結果の断面1~5と一致するように3.2m/s を鉛直方向に一定で与えた。この値は,実験時の境界か





ら 250cm の位置での風速 3.0m/s と異なっているが,これ は実験時では模型を設置した場合に,風速の鉛直分布が 完全に一定となっていないためである。計算時間は風の 場の渦の変動が一定となるまでの期間を計算し,その平 均値を整理した。

(2) 飛来塩分粒子の輸送・到達過程の計算

飛来塩分粒子の計算領域は、断面方向の拡散の影響を 考慮し、長さ2.5m、幅0.9m、高さ2.0mの3次元空間と した。計算の入力条件となる風況の計算結果は鉛直2次 元空間であるため、断面方向に計算結果を一様に拡張し、 その結果を入力した。飛来塩分粒子は、風上側の境界位 置においてランダムに配置した。計算に配置した飛来塩 分粒子は約30万粒子である。粒子の代表粒径は、事前に 粒径を変化させた感度解析を実施し、実験結果の傾向を おおむね再現できた直径22μmの1種類とした。



図-14 橋桁表面に到達した塩分粒子の計算結果

3.4 計算結果および考察

(1) 橋桁周辺の風速の分布

図-12は、実験で測定した風速と計算結果を比較した 結果である。図の右下の括弧内の数字は、実験における 整流板からの距離を示したものであり、図の中央の灰色 の部分は橋桁の床版の位置を示している。図より、計算 結果は、丸印で示す実験結果をおおむね再現できている ことがわかる。断面1~5では、橋桁の形状の影響を受け て床版近傍で風速が大きく減少しているが、その状況を 数値シミュレーションで再現できている。この結果より、 橋桁周辺の風速の分布を計算モデルで予測できているこ とがわかる。

図-13 は、橋桁周辺の風速分布を示した計算結果であ る。図の線は風の流れ、色は風速の値を示している。図 より、風速は橋桁の上下に大きく分かれて流れており、 橋桁近傍では風速が小さくなっていることがわかる。橋 桁上部では、高欄の背後で大きな風の渦が発生し、局所 的に風速が 3.0m/s 程度となっている。橋桁下部では、主 桁間の空間で渦が形成されており、風速は 1m/s 以下の弱 い風である。最も風上側の第 1~2 主桁間で形成されてい る渦は、他の渦と形が異なるが、この部分では風が安定 しない状況であり、計算条件によって渦の形状などが変 化する傾向が見られた。

(2) 橋桁表面に到達する飛来塩分粒子の計算結果

飛来塩分粒子の橋桁への到達過程を示した計算結果 を図-14に示す。図より,飛来塩分粒子は,風が吹き付 ける風上側に壁面に大量に到達しており,それ以外では 橋桁下部の主桁の先端部に比較的多く到達している傾向 が見られた。また,橋桁の上部面では,橋桁の風下側に 飛来塩分粒子が多く到達している。これは,風速分布の 結果で見られた橋桁上部に形成された風の渦によって, 飛来塩分粒子が輸送されているためである。



図-15は、橋桁表面に到達した飛来塩分粒子の到達塩 分量の計算結果と実験結果の比較である。図の到達塩分 量は、測点 No.1を基準とした塩分量の変動傾向を整理し た値である。図に示すように、計算結果の到達塩分量は、 部分的に差は見られるが、代表粒径を与える方法で、実 験結果の塩分量の変動傾向をおおむね再現できているこ とがわかる。

図(a)に示す橋桁上部では、風下側に向かって増加して いる塩分量の傾向を再現できているが、測点 No.24~28 で,計算結果の塩分量が過小評価となっている。これは、 今回の解析の飛来塩分粒子の粒径の設定が、多くの既往 研究で実施されているような代表粒径(1 種類)で設定す る方法であり、粒径が大きい飛来塩分粒子の影響を考慮 していないためであると考えられる。

図(b)の橋桁下部では, 主桁の下向に設置した測点 No.14 と No.17 で計算結果のほうが実験結果の塩分量よ り過大に示されおり,風上向の測点 No.13 と No.16 では 過小となっている。感水試験紙による塩分粒子の到達状 況の実験結果では,測点 No.16 に粒径 50µm 以上の飛来 塩分粒子が比較的に多く到達していた。

これらの点から,実験結果で得られたような橋桁の各 部位で到達粒径に大きく差がある場合では,大きい飛来 塩分粒子が到達している箇所で,計算結果の再現性が低 下する傾向があると考えられる。

5. 結論

構造物表面の飛来塩分粒子の到達量と到達粒径につい て検討を行った。その結果,海岸近傍に設置された構造 物では各部位で飛来塩分粒子の到達粒径が大きく異なっ ていることが明らかになった。さらに,飛来塩分粒子の 代表粒径を数値モデルに設定する方法では,到達塩分量 の全体的な傾向はおおむね再現できるが,大きい粒径が 到達している部分で局所的に再現性が低下する傾向があ ることが示された。

今後は,飛来塩分粒子の粒径分布を設定した数値シミ ュレーションを実施するとともに,構造物形状の違いに よる影響について検討する予定である。

謝辞

本研究は、日本学術振興会科学研究費(若手研究 A)「高 度な環境作用を統合したコンクリート構造物の環境劣化 予測システムの構築」(研究代表者:中村文則,課題番号: 17H04931)、公益社団法人日本コンクリート工学会「2017 年度研究助成:自然環境作用を利用したコンクリート構 造物の塩害劣化の軽減対策の検討」(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

- 吉次優祐,松田愛子,富山 潤,佐伯竜彦,藍檀オ メル: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16巻,pp.523-528, 2016.10
- 2) 富山 潤,羽渕貴士,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) 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
- 4) 山下将一,富山 潤,阿部和久,佐伯竜彦,紅露一 寛:風向を考慮した3次元数値解析によるコンクリ ート橋の付着塩分量推定,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17巻,pp.609-614,2017.10
- 5) 中西克佳,加藤真志,岩崎英治:風洞実験による橋 梁断面の部位別付着塩分評価手法に関する基礎的 研究,土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.67, No.2, pp.326-335, 2011.