

# 風環境条件に応じた橋桁への飛来塩分の到達過程に関する実験的研究

コンクリート研究室：GARZA BUSTAMANTE SEBASTIAN ISAAC

指導教員：中村文則

## 1. はじめ

日本に建設された多くの社会インフラが老朽化しており、その維持管理は重要な社会問題である。特にコンクリート橋梁における塩害劣化は、沿岸部を中心に深刻化しており、鋼材の腐食で発生するコンクリートの剥離といった劣化現象が橋梁の安全性と耐久性を損なう主要な要因となっている。この塩害劣化の原因は、海から運ばれる飛来塩分であり、構造物表面に付着することで劣化が進行する。

既往研究において実施された調査の結果、青海川橋では深刻な損傷が確認された。本橋は塩害の影響を強く受けており、特に陸側の橋桁に多くの損傷が認められた。これまでの知見では、海岸環境に起因する塩分の付着や施工時の材料・工法の影響、さらには微細なひび割れを通じた塩分浸透などが損傷の要因として考えられている。しかし、損傷が陸側のほうが多い傾向や特定部位への集中が見られる明確な理由は依然として解明されていない。

そこで、本研究では陸側の橋桁に塩分到達量の方が多い傾向を実験で明らかにすることが目的とする。

## 2. 対象とした橋梁

モデルを作ることには対象とした橋梁は、図-1 の新潟県糸魚川市に位置する青海川橋である。



図-1 モデルの対処とした橋梁

## 3. 実験概要

### 3.1 実験模型

実験模型は発泡スチロール製で、図-2 海川橋を1/5.7スケールで再現したもので、奥行は風洞の測定通路と同じ0.9mである。

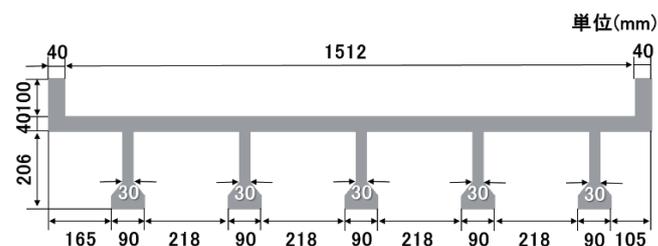


図-2 青海川橋の模型の断面

### 3.2 実験施設

この実験施設は、長さ 9m、幅 2m、高さ 2m の循環型風洞で構成されており、床面にはステンレスが使用され、側壁と上壁にはポリカーボネイトが採用されている。風、飛来塩分、降雨を発生させる仕組みが整備されており、測定領域は風洞中央部の長さ 5.5m、幅 0.9m、高さ 2.0m の範囲である。

風上側には、厚さ 0.5m の六角形型 (8mm メッシュ) の整流板が配置されている。飛沫粒子発生装置は平均粒径 20~100 $\mu$ m の飛沫を噴霧可能で、整流板の風上側に高さ 0.7m 及び 1.4m に各 1 台、合計 2 台の塩分を発生する器を設置した。

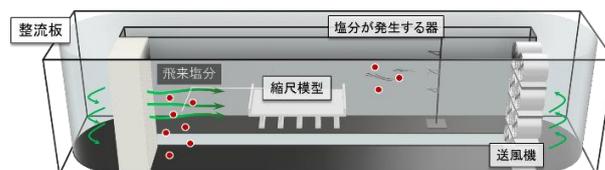


図-3 実験設置の全体図

### 3.3 実験条件

縮尺 1/5.7 の橋梁模型を測定領域内の高さ 1.0m, 整流板から 1.7m の位置に設置し, 風速 4.0m/s, 塩分濃度 3.0%の塩水飛沫を橋軸直角方向から作用させる. 飛沫粒子の粒径は平均 100 $\mu$ m となるよう調整し, 240 分間の暴露を行う.

### 3.4 実験方法

塩分到達量の測定にはドライガーゼ法を採用する. 捕集器は模型の高欄部分に 1 箇所, 下フランジ部分に 20 箇所, ウェブ部分に 10 箇所, 床版部分に 4 箇所の計 35 箇所に設置する.

暴露後のガーゼを 20ml の蒸留水に浸漬して攪拌し, 溶出される塩化物イオン濃度をイオンクロマトグラフィーで測定する. 測定値は暴露時間および受風口面積を基に単位時間・単位面積あたりの到達塩分量 (mdd: mg/dm<sup>2</sup>/day) として換算する.

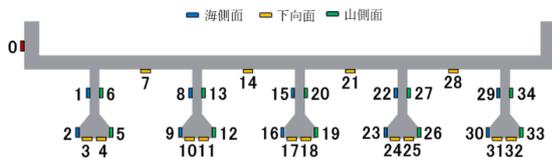


図-4 ガーゼの模型配置

縦 15mm×横 130mm の開口部があるアクリル板と, それに対応する開口部のないアクリル板の間に医療用ガーゼを 2 層挟み込んだ塩分捕集器を使用する.

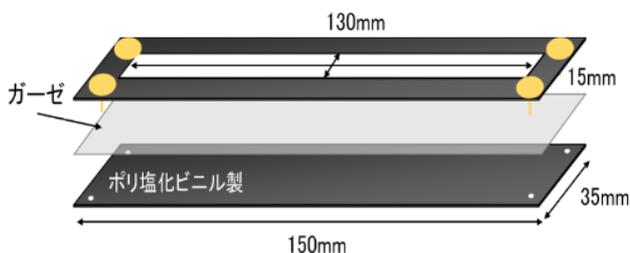


図-5 ガーゼの様子

風速の測定にはPropeller式の風速計を使用し, 測定通路内の模型周辺 140 点に設置してデータを

取得した. 測定は 1 秒間隔で 5 分間実施し, そのデータを平均化して風速分布を求めた. この方法により, 風洞内における模型周辺の詳細な風速特性を明らかにすることを旨とした.

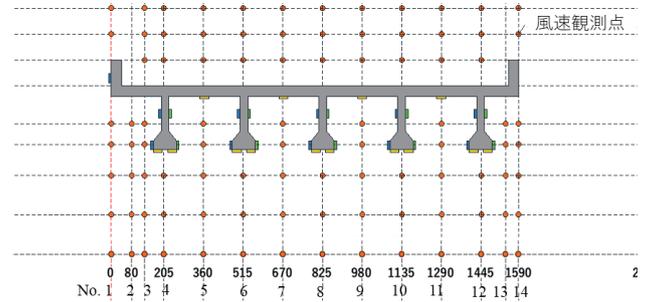


図-6 風速計の模型配置

### 3.5 空気流解析の方法

計算領域内の橋桁モデル周辺の風況を数値的にモデル化する. この計算領域では, OpenFOAM を使用し, 他のソフトウェアからの支援を受けています. 計算に用いる基礎方程式は, 式(1)に示す非圧縮性流体の運動方程式(Navier-Stokes 方程式と式(2)に示す連続の式(質量保存の式)である.

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + (\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} = -\frac{1}{\rho_a} \nabla p + \frac{\mu}{\rho_a} \nabla^2 \mathbf{U} + \mathbf{f} \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (2)$$

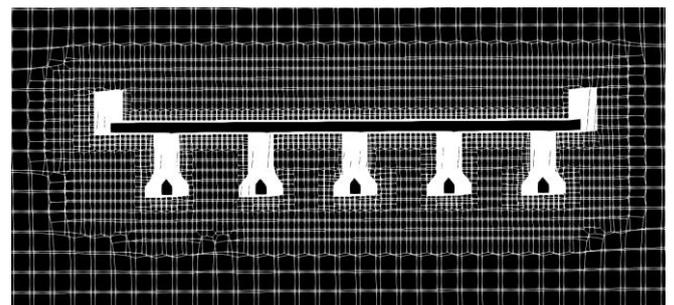


図-7 数値シミュレーションモデル

体積ベースのメッシュサイズは 100000 で設定した. また, 直方体の幅が 2.0m, 高さが 1.0m のモデル近傍では 2 レベルの再分割を行い, 計算を実行した. その結果, 次のメッシュが作られた.

XSim で設定した条件は以下の通り。

表-1 基本設定の条件

基本設定	
流れ	非定常
計算時間	100 秒
初期時間間隔	1.0 秒
最大クーラン数	0.9
解析タイプ	乱流
乱流モデル	LES (Smagorinsky)

OpenFOAM (オープンフォーム) は、流体力学シミュレーションに使用されるオープンソースの CFD ソフトウェアです。有限体積法を用いて流体の挙動を解析し、RANS や LES などの乱流モデルに対応しています。柔軟性が高く、ユーザーはソルバーや境界条件をカスタマイズ可能で、航空力学や水理学などの分野で広く利用されています。可視化には ParaView と連携できます。

表-2 OpenFOAM に入力したデータ

入力データ	
粒子数	50000 (10000×5)
時間間隔 DT	0.0005 秒
計算時間	4.0000 秒
粒子粒径 (直径)	1.0 μm
抵抗係数 CD	0.44
構造物表面密度低減率	1
乱流拡散係数	90.0~110.0

#### 4. 結果

実験結果と数値解析のデータをグラフで示す。シミュレーションモデルの動作を示す写真を用いて、定性的・定量的なデータの両面から考察を実地する。

#### 4.1 風速計実験結果

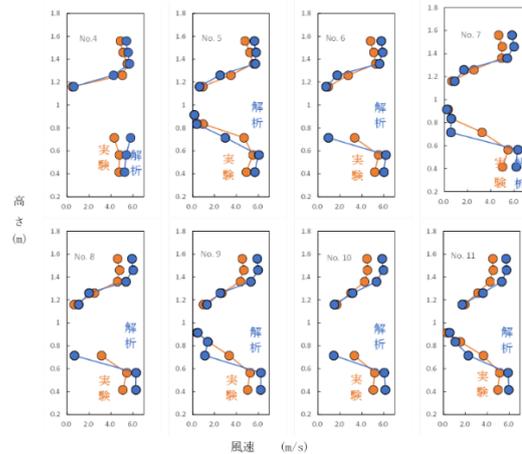


図-8 風速計の実験結果

風上側 0.5m では、風速は鉛直方向に約 4m/s で一定であり、モデルに近づくにつれて風速が低下していることがわかる。モデル付近の風速は 0m/s に近い。一方、モデルから上下に離れた位置では、風速が急に 6m/s 程度まで上昇しており、系の上端と下端で乱流挙動により風速が増加する傾向が確認された。

#### 4.2 塩分到達量実験結果

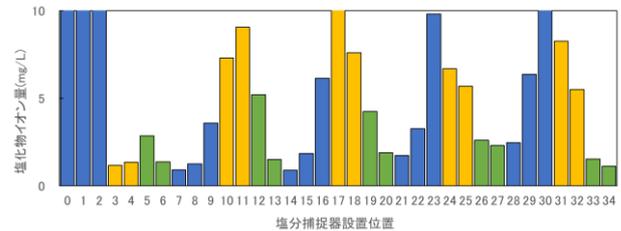


図-9 塩分到達量の実験結果

風下側に下フランジ各面に到達する塩分は、海側面 > 下向面 > 山側面の順で大きい傾向があるが、風上側に下フランジ各面に到達する塩分は、下向面 > 海側面 > 山側面の順で大きい傾向がある。また、山側面には塩分がほとんど到達していなかった。さらに、山側面と下向面で到達する塩分量に差異はほとんどないことが確認された。陸側に近いほど空気中の塩分付着量が高くなる傾向がある。

## 4.2 空気流解析結果

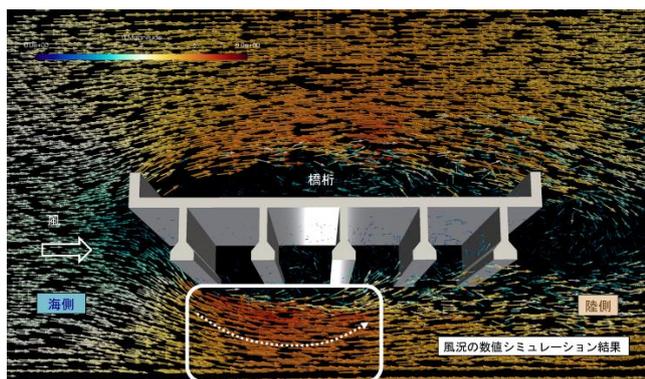


図-10 空気流解析の画像

橋梁の下に発生する風のパターンは塩分到達量に直接な影響を与えていると言える。

風向のパターンは、海側の高欄部位にぶつかり、海側の第2橋桁と第3橋桁の下周辺にパラボラのように流れ、陸側の第4橋桁と第5橋桁に風を最も当たるところであると考えられる。このため、第4橋桁と第5橋桁は風向の過程で塩分到達量が最も多いと確認された。

最後の2本の桁の間に渦の挙動があることが推測できる。もし渦があるのであれば、その部分には空気中の塩分がより多く蓄積するはずなので、これは実験にとって重要な定性的側面である。

## 5. 結論

橋梁の塩害劣化に関する理解を深めるため、風洞実験を実施し、風による飛来塩分の陸側への到達特性を詳細に分析した。縮尺模型を用いた実験の結果、橋桁周辺の風況と渦の発生が飛来塩分の付着量に大きく影響を与えることが明らかとなった。特に、図5-3に示すように、橋梁下に発生する風のパターンが塩分到達量に直接的な影響を与えていることが確認された。

風向のパターンとして、海側の高欄部位にぶつかった風が、海側の第2橋桁と第3橋桁の下周辺でパラボラ状に流れ、その後、陸側の第4橋桁と第5橋桁に最も強く当たることが観察された。このため、第4橋桁と第5橋桁は風向の影響

を強く受け、飛来塩分の到達量が最も多くなる部位であると確認された。

これらの結果から、橋梁における塩害リスクを評価する際、橋桁周辺の風況と渦の発生を考慮することが重要であることが示唆された。特に、第4橋桁と第5橋桁の塩害リスクが最も高いことが確認され、今後の維持管理計画の策定において優先的に考慮すべき要因である。本研究の成果は、橋梁の塩害対策を検討する上で重要な知見を提供し、耐久性向上に寄与するものである。今後は、より高精度な数値シミュレーションを実施し、風況と飛来塩分の相互作用を詳細に解析することで、さらに現実的な塩害対策の指針を確立することが求められる。

## 6. 参考文献

- 中村文則, 山口貴幸, 神田佳一, 下村匠: 海水飛沫粒子を再現した模型実験による構造物への粒子到達過程の推定, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol175, No. 2, 1153-I\_1158, 2019
- 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.