

京都大学工学部 学生員 ○三歩一 奏人
 京都大学大学院工学研究科 学生員 金城 佑紀
 京都大学大学院工学研究科 正員 安 琳

京都大学大学院工学研究科 学生員 野口 恭平
 京都大学大学院工学研究科 学生員 秦 聡一郎
 京都大学大学院工学研究科 正員 白土 博通

1. 序論 飛来塩分に起因するコンクリート構造物の劣化は看過できるものでない。そのため構造物各部位への塩分付着量の定量的評価、及び浸透塩分量予測は維持管理において重要である。腐食は一度顕在化すると進行が速いため潜伏期を正確に評価することが求められる。しかし、既存の付着塩分量の評価方法は海岸線からの距離で定められており、部位ごとの付着量の予測方法は確立していない。また、塩化物イオン濃度分布は Fick の拡散方程式を利用し、見かけの拡散係数と表面塩化物イオン濃度を設定することで評価されるが、環境に応じて特に見かけの拡散係数は変化するため精度が低下する可能性がある。特に、雨と湿度変化による乾湿の繰り返し、及び海陸風による塩分供給の繰り返しが考えられるが、それらを踏まえた塩化物イオンの浸透機構も十分に解明されていない。本研究では飛来塩分に着目し、現地観測、室内試験、数値計算を基に構造物の部位ごとの付着分布と塩分侵入における乾湿の繰り返しの影響を検討する。

2. モルタルパネル暴露試験 和歌山県の天鳥橋で飛来塩分付着分布計測を行った。天鳥橋は3主桁を有する鋼橋で、橋軸は北北西-南南東であり、西側は太平洋に、東側は崖に面する。40×40×5mmのモルタルパネルを3主桁のフランジ・ウェブ上の計30か所(図1)に貼り付け暴露させた。暴露期間は2014年9月19日~10月24日で、回収後に電位差滴定によりモルタルに含まれる全塩化物イオン濃度を測定した。また同期間に橋梁桁表面に付着した塩分量の測定をモルタル設置箇所付近で行った(図2)。ただし両者は異なる次元で得られているので、各々のAの測定値で除して無次元化した。モルタルと橋梁桁表面では異なる傾向が見られた。モルタルの含有全塩化物イオン濃度はOやY、Zのようにフランジ下

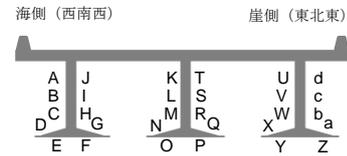


図1 飛来塩分空間分布計測位置

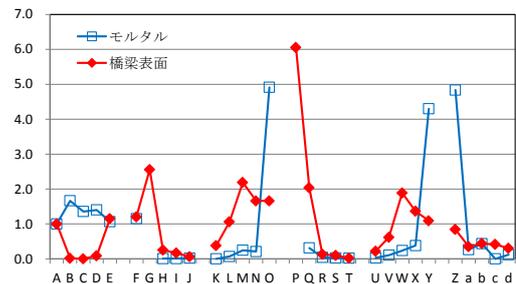


図2 モルタルパネルと橋梁桁表面の付着塩分比較

面で多くなる傾向が見られたが、橋梁桁表面ではそのような傾向は顕著に見られない。異なる傾向が見られた一要因として、フランジ下面まで表面をつたって塩分と流下した結露水や雨水をモルタルが直接吸水したことが考えられるが、今後も観測を継続し、断面周辺の塩分環境や付着機構を詳細に検討する必要がある。

3. 乾湿繰り返し試験 乾湿の繰り返しがコンクリート内部の塩化物イオン濃度分布に及ぼす影響を調べるために室内試験を行った。まず1分間供試体(150×150×50mm)の一面を10%の塩化ナトリウム水溶液に浸漬し、恒温恒湿室内で乾燥させた。乾燥時間を変えて同様の操作を行い全部で4case行った。乾燥時間はcase1から順に30分、2時間、12時間、3日である。この操作を1サイクルとし全部で20サイクル行った。20サイクル終了後に供試体内部の全塩化物イオン濃度を電位差滴定により測定した。また浸漬方法は毛細管の吸水原理を利用し1分間塩水に漬け続ける方法(単純浸漬)と蒸気拡散による吸湿原理を利用し霧吹きで塩水を吹付ける方法(霧吹き)

の2つを用いた。

4. 乾湿繰り返し後の塩化物イオン濃度分布計算

有限差分法を用いて乾湿繰り返し後の塩化物イオン濃度分布を計算し室内試験の各 case の分布を再現した。まずコンクリート細孔内の飽和度分布を求め、それを利用して塩化物イオン濃度を計算した^{1),2)}。計算領域は浸漬面から 150mm の 1 次元領域とし、奥行と幅は考えないものとする。

4.1 飽和度分布計算 飽和度分布を求める際の支配方程式は Fick の拡散方程式 (式(1)) である。拡散係数 $D(\theta)$ は毛細管の吸水による拡散が生じる範囲と蒸気拡散が生じる範囲で互いに異なる値を用いた。また霧吹きは全領域で蒸気拡散を仮定した。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (1)$$

θ : 細孔中の飽和度, x : 浸漬面からの深さ (mm),
 t : 経過時間 (s), $D(\theta)$: 水の拡散係数 (mm²/s)

4.2 塩化物イオン濃度計算 塩化物イオン濃度計算は移流拡散方程式 (式(2)) を用いた。

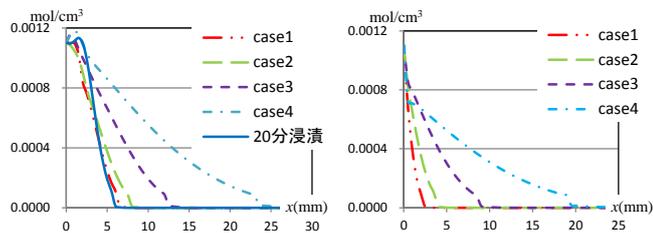
$$\frac{\partial C_t}{\partial t} = -\nabla \cdot (j_{c,cl} + j_{d,cl}) \quad (2)$$

C_t : 全塩化物イオン濃度 (mol/mm³)

$j_{c,cl}, j_{d,cl}$: 移流, 拡散による流量フラックス (mol/mm²/s)

なお計算には固定塩化物イオンと自由塩化物イオンの両方を考慮し、全塩化物イオンはその和を示す。

図3に20サイクル目の浸漬後の塩化物イオン濃度分布の計算結果を示す。



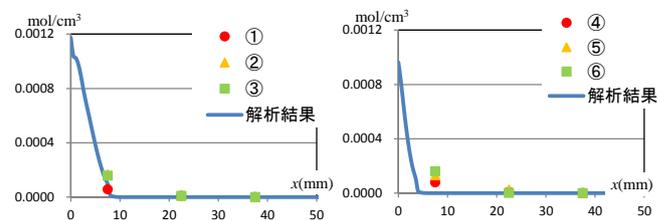
左図：単純浸漬，右図：霧吹き

図3 20サイクル終了後の塩化物イオン分布

単純浸漬の場合、乾燥時間の長い case3, case4 では浸漬終了後の塩化物イオン分布は浸漬面から 2mm 付近でピークを示す。これは表層部で毛細管による吸水の影響が大きくなったためと考えられる。一方、霧吹きの場合、乾燥時間によらずピークは見られず浸漬面から拡散が支配的と分かる。また、左図中の

実線は乾燥なしで吸水を継続させたときの計算結果であり、乾湿を繰り返した方がサイクルごとの毛細管による吸水力が大きくなるため、塩化物イオン濃度、塩化物イオン到達域は大きくなる事が分かる。

5. 室内試験と数値計算の比較 図4に乾燥時間が2時間の場合の室内試験と数値計算の比較を示す。①～⑥は室内試験の供試体番号を意味する。霧吹きは粒径が大きいため部分的に毛細管による吸水が生じたため実験結果と解析結果の間に差が生じたと考えられる。今後、試料採取方法を再度検討し室内試験の精度を高め、解析の妥当性を検証する必要がある。また、霧吹きで用いた拡散係数、境界条件は試験的に導入したため、室内試験・現地観測結果を表すよう最適値を決定する必要がある。



左図：単純浸漬，右図：霧吹き

図4 室内試験と数値計算の比較

6. 結論と課題

- 1) 橋梁主桁に設置したモルタルパネルから測定された飛来塩分空間分布は橋梁桁表面の分布とは異なる可能性がある。
- 2) 乾燥時間が長くなると毛細管による吸水力が大きくなり移流の影響が大きくなり表層部分からある深さに表面より高い塩分濃度が発生した。
- 3) 乾湿を繰り返すことで内部の塩化物イオンの濃度及び到達域は大きくなる事が分かった。
- 4) 室内試験や数値解析を通して霧吹きで用いる拡散係数、制約条件を決定する必要がある。

謝辞 現地観測と室内試験において紀南河川国道事務所、元京都大学技術職員河内伸治氏、京都大学技術職員平野裕一氏の御協力を得た。また、モルタルパネルは電気化学工業株式会社に御提供いただいた。

参考文献

- 1) Li et al., THINGHUA SCIENCE AND TECHNOLOGY ISSN, Vol.13, No. 5, 1007-0214, 19/25, pp696-701, October, 2008
- 2) Lin et al., Cement & Concrete Composites 32, pp571-579, 2010