

コンクリート構造物の表面における塩分の移動と停留メカニズムの検討

長岡技術科学大学大学院 学生会員 ○原田 健二
長岡技術科学大学 正会員 下村 匠

Abstract : Chloride attack by de-icing agent progresses by penetration of water contained de-icing agent penetration into concrete. Precise prediction of chloride penetration should be based on understanding of transport of water and chloride on the surface of concrete structure. In this study, distribution of chloride on the surface of actual structure was measured and mechanism of movement of chloride was discussed. Distribution of surface chloride of actual structure was simulated by numerical analysis. Result of observation of distribution of surface chloride on the surface of actual structure showed that surface chloride is high at the edge of leakage zone of water. The analytical result could well simulate the characteristic of surface chloride on the actual structure.

Key words : de-icing agent, chloride attack, distribution of surface chloride, numerical simulation

1. はじめに

凍結防止剤による塩害は、塩分を含んだ路面排水が構造物表面を流動し、それがコンクリート内部に浸透することで進行する。著者らは、これまでの研究¹⁾において、構造物表面の水の流動範囲を表面流動解析により求め、水の流動箇所において深さ方向の水分・塩分浸透解析を行うことで、構造物中の凍結防止剤による塩害箇所とその進行の予測を試みている。現段階では、構造物中の流水痕が見られた箇所とそうでない箇所における塩分浸透の違いは再現できるが、流水痕が見られた各部位による塩分浸透の違いを詳細に再現できていない。同一構造物中の部位によるコンクリート内部への塩分浸透量の違いは、構造物表面を流動する水による塩分の供給や洗い流しの影響が位置により異なるからであると考えられる。これらを数値解析において表現するには、構造物表面における塩分移動メカニズムの詳細を把握し、それを反映する必要がある。

本研究では、実構造物表面の塩分分布より、構造物表面における塩分の移動および浸透、洗い流しのメカニズムを推察し、それらを数値解析モデルにおいて表現することで構造物中の塩分分布予測の高精度化に資することを目的とする。

2. 実構造物における表面塩分濃度分布の調査概要

2.1 表面の塩分濃度分布測定方法²⁾

分光分析により構造物表面の塩分濃度分布を測定した。分光分析は、図-1に示すようにプローブヘッドのハロゲンランプをコンクリート表面に照射し、その反射光を光ファイバーに集光させ、測定された波長と吸光度のデータを、あらかじめ作成された検量線に適用することでコンクリートの表面塩分濃度を推定する仕組みとなっている。プローブヘッドを走査させることで構造物表面の面的な塩分分布を把握することができる。

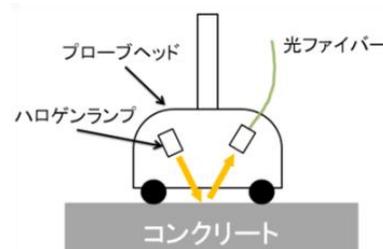


図-1 測定方法

2.2 調査橋梁及び表面塩分濃度調査範囲概要

新潟県内陸部にある1984年に供用開始されたPC橋梁の構造物表面の塩分濃度分布を2012年の夏季

に調査した。塩分濃度分布の調査範囲は図-2 に示すように床板裏と張出し部裏の赤枠で囲まれている範囲とした。いずれの調査範囲も目視により構造物表面に流水痕が確認されている。

2. 3 測定結果および考察

当該橋梁の形状、展開図、漏水痕、分光分析による構造物表面の塩分濃度分布の測定結果を図-3 に示す。図-2、図-3 の床板裏の ABCD と張出し部裏の EFGH の位置は対応している、分光分析の測定値は最小値を 0、最大値を 5.0 としてコンター図により表示する。

図-3 より、構造物表面において観察された流水痕と分光分析による測定結果を比較すると、全体的な特徴として、同じ流水痕でも塩分濃度が高く検出される箇所とそうでない箇所があることが確認された。張出し部裏(EFGH)は、桁端部近傍(EG 側)の塩分濃度が低く、桁端でない側(FH 側)が比較的高いということが確認された。床板裏は流水痕の中心部分が塩分濃度が低く、その周辺が比較的高いということが確認された。その理由としては、図-4 に示すように構造物表面の水が流れる範囲よりも広い範囲に水分が浸透することが関係していると考えられる。すなわち、冬季においては表面に水が流れる範囲から浸透した水分および塩分は、コンクリート内部で横方向にも浸透するが、冬季以外の季節では、表面に水が流れる範囲のみ洗い流しが行われるので、その結果コンクリート表面の流水痕の縁部で塩分濃度が高くなると考えられる。今回の表面の塩分分布の調査は夏に行われたものであるため、直接水が流れたと考えられる流水痕の中心部の塩分濃度が低く、直接水が流れないような流水痕の縁部の塩分濃度が高くなったと考えられる。

以上のことから、コンクリート中の深さ方向だけでなく横方向を含めて 2 次元的な水分・塩分浸透も構造物表面の塩分濃度分布に影響を与えていると考えられる。

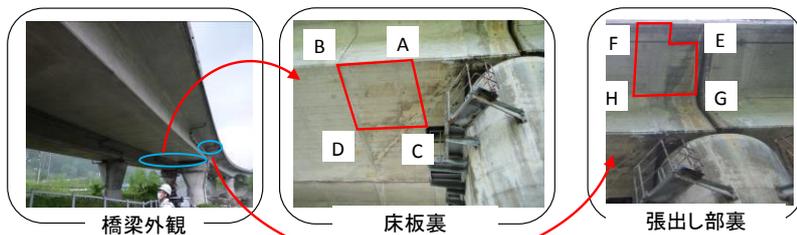


図-2 調査範囲概要

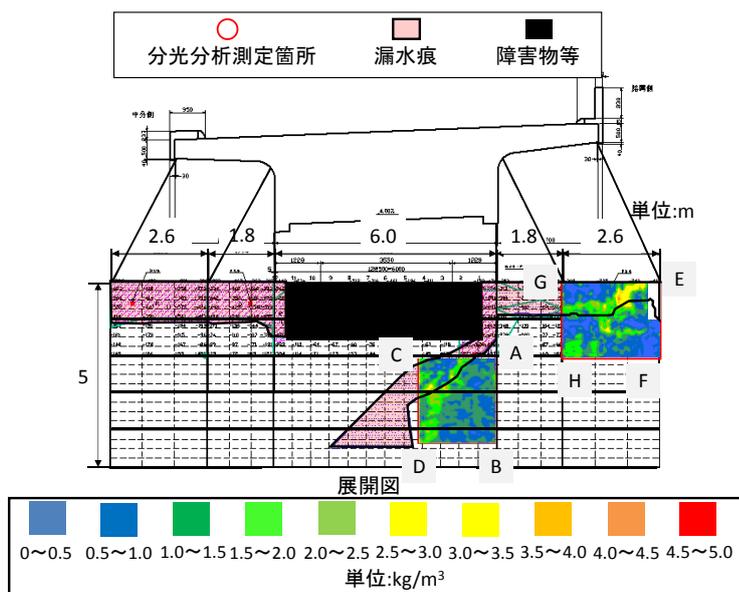
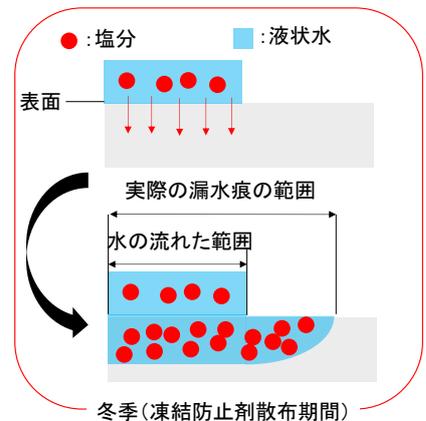
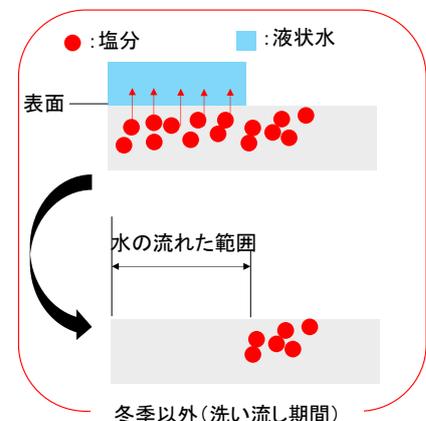


図-3 分光分析による表面塩分分布



冬季(凍結防止剤散布期間)



冬季以外(洗い流し期間)

図-4 塩分移動のイメージ図

3. コンクリート中の2次元水分・塩分浸透解析

3.1 数値解析モデルの概要³⁾

コンクリート中の水分の移動は、水蒸気拡散、液状水移動を考慮する。塩分の移動は液状水に溶解している塩化物イオンが液状水と共に移動するバルク移動と、液状水中の濃度拡散、塩化物イオンのセメント硬化体への固定を考慮する。これらを組み込んだ数値解析プログラムを用いて、2次元解析を行うことで水平移動を考慮した場合のコンクリート内部及び表面近傍の塩分分布を求める。式(1)は水分移動の、式(2)は塩分移動の質量保存方程式である。

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\text{div}(J_v + J_l) \tag{1}$$

$$\frac{\partial C_{total}}{\partial t} = -\text{div}\left(\frac{C_f}{\rho} J_l + J_{difCl}\right) \tag{2}$$

ここに、 w ：コンクリート単位体積中の水分量[kg/m^3]、 J_v ：水蒸気の拡散移動流束[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]、 J_l ：不飽和状態における液状水の移動流束[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]、 C_{total} ：コンクリートの単位体積中の全塩分量[kg/m^3]、 C_f ：液状水単位体積中の自由塩化物イオン量[kg/m^3]、 ρ ：液状水の密度[kg/m^3]、 J_{difCl} ：液状水中の塩化物イオンの濃度拡散流束[$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$]、である。

3.2 境界条件の設定方法

本研究では図-5 に示すように、桁端部から発生した漏水が張出し部裏を移動する状況を解析対象とする。表面の一部では表面を流れる液状水の吸水が生じ、それ以外の部分では大気と接触するので乾燥、もしくは吸湿する環境となる。表面が大気に接触する場合、大気とコンクリート表面との間の湿度勾配により水分の出入りが生じるとする(自然境界条件)。一方、液状水が接触するコンクリート表面では、表面の要素が瞬時に飽和し、内部はまだ不飽和である部分飽和の状態、毛細管現象による表面からの吸水が生じると考えられる。しかし、本研究では、不飽和状態の水分移動解析と部分飽和状態における吸水分析を簡易的に同じ方法で行うことを優先し、表面に液状水が接触する場合の境界条件を、外部の相対湿度 100%とした自然境界条件により近似的に与えることにする。以上の仮定に基づき境界における水分の移動流束 J_s および J_{cs} 、塩分の移動流束 J_{Cl} を表-1 のように設定する。表-1 において、 D_w ：境界における水分量に対応する水分拡散係数[m^2/s]、 w ：コンクリート表面の水分量[kg/m^3]、 w_b ：雰囲気の相対湿度に平衡する液状水量[kg/m^3]、 h ：境界層の厚さ[m]、 w_o ：相対湿度 100%(飽和)に平衡する液状水量[kg/m^3]である。

3.3 解析方法

湿潤期間における液状水の接触範囲、計算範囲、計算要素の寸法は図-5 に示すように設定した。水分・塩分浸透の解析期間は 7300 日とした。乾湿サイクルは乾燥 5 日、湿潤 2 日を繰り返すものとした。湿潤時に構造物表面に接触する液状水の塩分濃度は季節変動するものとし、冬季(12, 1, 2 月)は表面に接触する水の塩分濃度は 5%、それ以外の季節には 0%とした。大気の色度は 20°C 、相対湿度は 40%一定とした。

表-1 境界における水分と塩分の移動流束

	境界条件	水分	塩分
大気	自然	$J_s = D_w \frac{w - w_b}{h}$	0
液状水	固定	$w = w_o$	$J_{Cl} = \frac{C_f}{\rho} J_{cs} + J_{difCl}$
	自然(近似)	$J_{cs} = D_w \frac{w - w_o}{h}$	

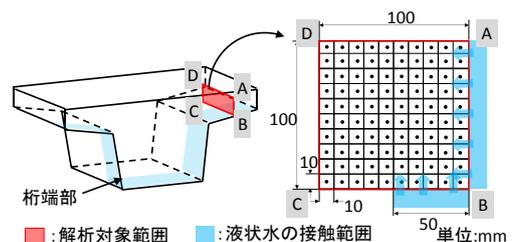


図-5 解析対象イメージ図

3. 4 解析結果および考察

洗い流し前(7025 日=暴露 20 年目の冬の終了時点)におけるコンクリート表面の塩分分布および洗い流し後(7300 日=暴露 20 年目の秋の終了時点)における塩分濃度分布を図-6 に示す。いずれの図も最小値を 0, 最大値を 10 としたコンター図を示している。

図-6 より, コンクリート中への 2 次元浸透解析を行うことで, 表面が液状水と接触しない位置でも塩分が浸透する様子を再現できていることが確認された。表面が液状水と接触する位置においては洗い流しの影響により表面近傍の塩分濃度は低下するが, 液状水と接触しない位置ではほとんど低下しないことが確認された。その結果, 計算期間が長期間になると表面が液状水と接触しない位置のほうが塩分浸透量が多くなることが確認された。本解析結果では長期間になると, 表面近傍の塩分濃度は表面に液状水が接触する箇所(たとえば桁端部近傍)より液状水が接触しない箇所(たとえば流水痕の縁近傍)が高くなるという傾向を示した。これは実橋梁で確認された表面塩分濃度の分布と同じ傾向であるため, 本解析により構造物表面近傍における水分移動に伴う塩分移動の特徴を良好に再現できているといえる。内部の塩分濃度分布に関しては, 今後の実験及び実構造物への塩分浸透量の調査による検証が待たれる。

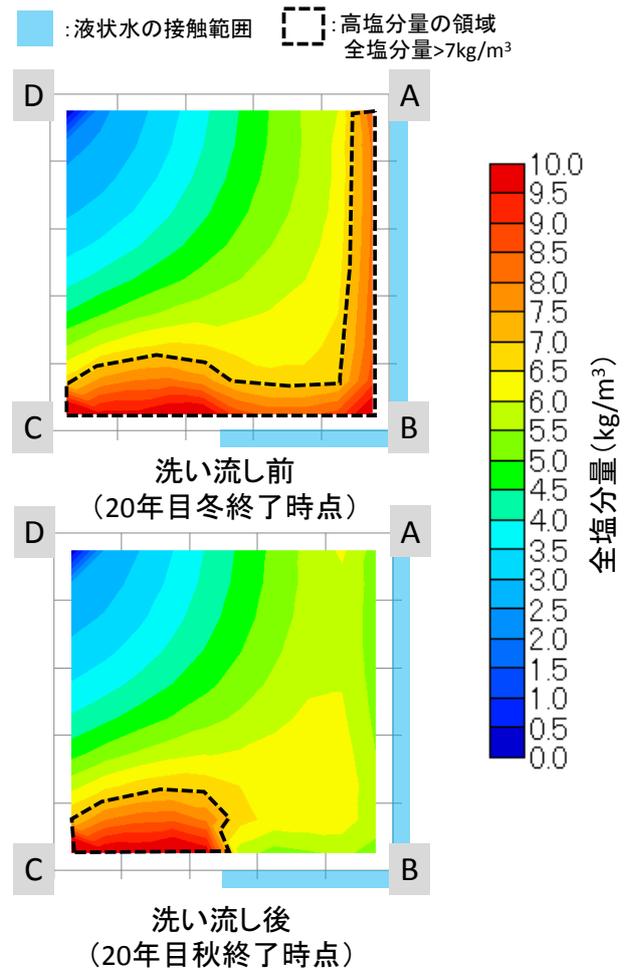


図-6 塩分分布図

4. まとめ

- 1) 凍結防止剤散布地域における実橋梁の夏季の表面塩分濃度分布の調査結果より, 桁端部近傍の流水痕の表面塩分濃度より桁端部側でない箇所の流水痕の縁近傍の表面塩分濃度が高いことが確認された。この傾向は, コンクリート中への水分と塩分の浸透が2次元的事象であることとコンクリート表面の流水による塩分の洗い流しの影響によると考えられた。
- 2) コンクリート中への水分・塩分の2次元浸透解析を行うことにより, 構造物表面において液状水が流れる箇所より, 液状水が流れない箇所のほうが表面近傍の塩分濃度が高くなる傾向が再現できることがわかった。

参考文献

- 1) 原田健二, 下村匠: 凍結防止剤によるコンクリート橋への塩分浸透の空間分布と進行の数値解析, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, Vol.21, pp.219~222, 2012.10
- 2) 戸田勝哉, 中村善彦, 倉田孝男: 分光分析法を用いたコンクリート劣化診断システムの開発, IHI 技報, Vol.52, No.1, 2012
- 3) 小林悟志, 下村匠: コンクリート中の物質移動と鉄筋の腐食に関する数値解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp831-836, 2002