

構造物表面における水の流動に伴う塩分の輸送と コンクリート中への侵入に関する統合解析

指導教員 下村 匠
コンクリート研究室 原田 健二

1. はじめに

積雪寒冷地では冬季に路面凍結を防ぐために凍結防止剤の散布が行われている。そのため、飛来塩分の影響がないような山間部のコンクリート構造物においても塩害事例が多く発生している。

凍結防止剤による塩害の特徴としては、損傷箇所が伸縮装置部の漏水箇所などで局所的に生じることなどが挙げられる。これには、次のように現象が関与していると考えられる。冬季には、構造物表面が凍結防止剤の塩分を含んだ水に接し、コンクリート中に浸透する。また、表面を流れる水が表面に付着している塩分を溶解させながら移動することで、塩分を再分配させることもある。高湿度の環境では、表面に付着している塩分の潮解が起こり、吸湿とともにコンクリート表面から高濃度の塩水が供給される場合もあると考えられる。このように、凍結防止剤によるコンクリート中への塩分の浸透とその分布は、構造物表面の水の流れと密接な関係がある。そのため、これを適切に評価するには、構造物表面の水の流れ、表面に流れる水に含まれる塩分の季節的な変動、表面に付着している塩分のコンクリート内部への浸透の形態などを正しく考慮する必要がある。

以上から本研究では、構造物表面の水の流れとこれに伴うコンクリート内部への塩分浸透の数値解析による再現方法について検討を行った。そして、実構造物における表面の流水痕と各部位における塩分浸透の実測結果と数値解析による再現結果との比較を行った。

2. 数値解析手法

2.1 数値解析概要

数値解析の概要を図-1 に示す。まず構造物表面における水の流動解析をし、構造物表面の各位置における液状水の流動状況を把握する。その結果と、各時刻における構造物周辺の温度湿度、表面の液状水の塩分濃度を入力値として、各位置での深さ方向の水分と塩分の浸透解析を行う。

2.2 構造物表面における水の流動解析

構造物表面における水の流動解析では図-2 に示すように構造物表面に xy 平面を設定する。重力を駆動力としたコンクリート表面の水の定常状態における移動を以下の式(1)~(3)で表現する。

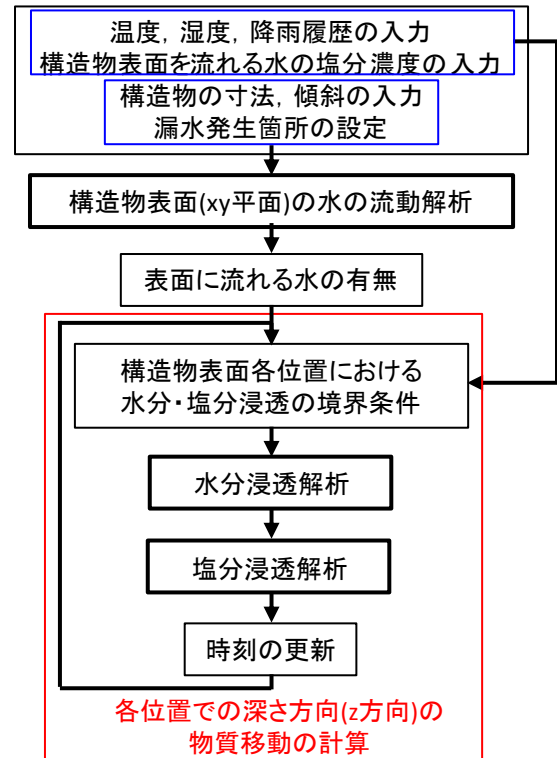


図-1 解析全体概要

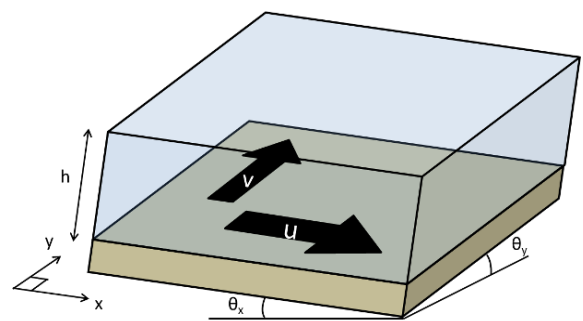


図-2 構造物表面における水の流れ

$$\frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \cos \theta_x \frac{\partial h}{\partial x} + g \sin \theta_x - fu \quad (2)$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \cos \theta_y \frac{\partial h}{\partial y} + g \sin \theta_y - fv \quad (3)$$

ここに、 u : x 方向の流速[m/s], v : y 方向の流速[m/s], h : 構造物表面からの水面の高さ[m], θ_x : x 方向の傾斜[rad], θ_y : y 方向の傾斜[rad], f : 摩擦損失係数[1/s]である。式(1)は質量保存則, 式(2)は x 方向の運動方程式, 式(3)は y 方向の運動方程式である。 θ_x , θ_y の傾斜角は, 構造物の縦断勾配や横断勾配, 寸法から算定される値を用いる。 f は実験係数であるため, 後述する室内実験より求めた値を用いる。

式(1), (2), (3)を離散化し, 各位置での流入量と流出量が等しくなるように差分方程式を解く。差分方程式を解く際には境界での流入量を設定する必要がある。桁端面から漏水が発生する場合, 桁端面での h , u , v の値を境界条件として与える。

2.3 コンクリート中における水分・塩分浸透解析¹⁾

コンクリート中の水分の移動は, 不飽和状態における水蒸気拡散, 液状水移動, 表面が液状水に接した場合の液状水の吸水を考慮する。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, 奥行き方向(z 方向)への1次元解析を行い, 塩化物イオンの浸透量を求める。式(4)は水分移動の, 式(5)は塩分移動の質量保存方程式である。

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\text{div}(J_v + J_l + J_{cs}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial C_{total}}{\partial t} = -\text{div}\left(\frac{C_f}{\rho}(J_l + J_{cs}) + J_{difCl}\right) \quad (5)$$

ここに、 w : コンクリート単位体積中の水分量[kg/m³], J_v : 水蒸気の拡散移動流束[kg/m²s], J_l : 不飽和状態における液状水の移動流束[kg/m²s], J_{cs} : 表面からの毛細管吸水による液状水の流束[kg/m²s], C_{total} : コンクリートの単位体積中の全塩分量[kg/m³], C_f : 液状水単位体積中の自由塩化物イオン量[kg/m³], ρ : 液状水の密度[kg/m³], J_{difCl} : 液状水中の塩化物イオンの濃度拡散流束[kg/m²s], である。

2.4 水分・塩分浸透解析における境界条件と潮解の考慮

水分と塩分の浸透解析では温度, 湿度, 降雨履歴を考慮する。これらは, 気象台の日平均のデータを用いる。降雨に関しては, 気象台の気象データの降雨量が少しでもある時間帯を降雨時間とし, 日ごとの合計の乾燥時間と降雨時間を算出し, 1日の乾湿サイクルを合計の乾燥時間と合計の降雨時間の1サイクルとするように並び替えたものを用いる。構造物表面の水の流動解析の結果, 降雨時間に表面に水が流れていると判定された箇所では吸水計算を行い, それ以外の場合は表面が大気に接していると判定し不飽和拡散計算を行う。冬季(1, 2, 12月)においては表面に流れる水には凍結防止剤の塩分が含ま

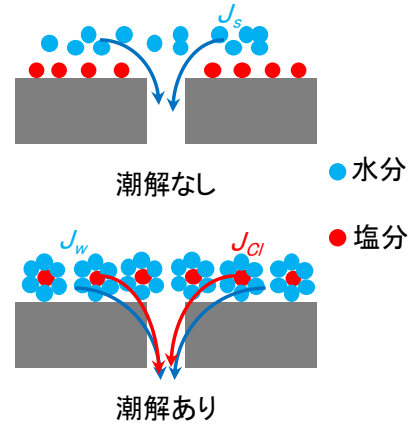


図-3 表面における塩分の潮解イメージ図

れているとし, 冬季以外においては含まれていないとする。

本研究では, コンクリート表面に存在する塩分の潮解が水分浸透と塩分浸透に及ぼす影響を考慮する。図-3に潮解が発生した場合と発生しない場合の水分と塩分の浸透を模式的に示す。塩化ナトリウムの結晶の近傍では

表-1 境界における水分と塩分の移動流束

	水分	塩分
不飽和拡散 (潮解なし)	$J_s = D_w \frac{w - w_b}{h}$	0
不飽和拡散 (潮解あり)	$J_w = D_w \frac{w - w_o}{h}$	$J_{Cl} = \frac{C_f}{\rho} J_w + J_{difCl}$
吸水時	$J_{cs} = \text{吸水モデル}$	$J_{Cl} = \frac{C_f}{\rho} J_{cs} + J_{difCl}$

飽和水蒸気圧が低下する。雰囲気中の相対湿度から計算される外気の水蒸気圧がこの結晶近傍の飽和水蒸気圧より大きい場合には, 塩化ナトリウム結晶表面に水分が凝縮する。この凝縮水に塩分が溶解することにより不飽和時であってもコンクリート中に塩分が浸透する。一方, 潮解が発生しない場合には不飽和時には水分のみが浸透する。コンクリート中への塩分浸透の精密な予測には, 潮解を考慮する必要があると考えられる。

表-1には本研究の解析において考慮する, 吸水時および潮解が生じる場合と生じない場合の不飽和拡散時の境界における水分と塩分の移動流束を示す。吸水時の表面における水分移動の流束は, 吸水モデル²⁾より算出する。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[m²/s], w : コンクリート表面の水分量[kg/m³], w_b : 雰囲気中の相対湿度に平衡する液状水量[kg/m³], h : 境界層の厚さ[m], w_o : 相対湿度100%に平衡する液状水量[kg/m³]である。

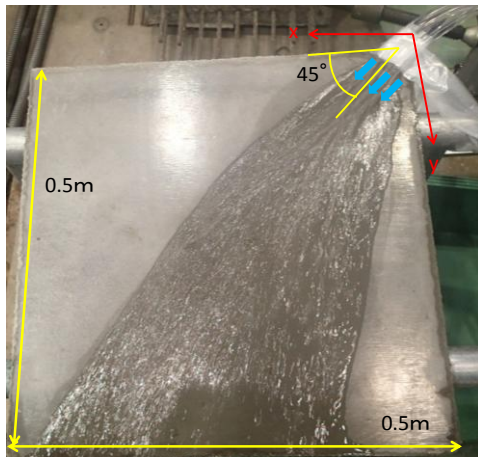


図-4 実験風景

3. 構造物表面における水の流動解析の検証実験

3.1 実験および解析概要

重力方向に対する構造物表面の角度を x 方向および y 方向の傾斜角によって表現する。傾斜角が -90° から 90° の場合を上向き面、 -180° から -90° および 90° から 180° の場合下向き面と呼ぶ。実験は $\theta_x = 0^\circ$, $\theta_y = 5^\circ$ (上向き面)になるようにした場合と $\theta_x = 180^\circ$, $\theta_y = 175^\circ$ (下向き面)になるようにした場合を行った。

図-4 に示すように試験体の隅からホースで 45° 方向に水を流す方法で行った。

解析は、実測値と同じ流量を境界条件として与えて行った。すなわち、流入箇所の境界条件として $h=0.008[\text{m}]$, $u=0.98[\text{m/s}]$, $v=0.98[\text{m/s}]$ を与えた。実験係数である摩擦損失係数 f は、実測値と最も近似する値であった $2.0[1/\text{s}]$ 用いた。

3.2 結果および考察

図-5、図-6 は上向き面における水の流動箇所の実測値と解析値を示している。図-7、図-8 は下向き面における水の流動箇所の実測値と解析値を示している。いずれの図も赤色で表示されている箇所が水の流動箇所である。解析では h が 0.0001m 以上の箇所は水が流れていると判定した。

図-5、図-6 より、解析により上向き面における水の流動箇所を概ね再現できていることが確認された。また、流出口から拡散していくような流れの傾向も再現できている。図-7、図-8 より、下向き面においても解析値は実測値を良好に再現できていることが確認された。また、下向き面では流出口からの拡散せずに収束していく流れの傾向も再現できている。

以上より、傾斜や表面の状態が一様であるならば、適切な境界条件と構造物表面の状態を適切に表す摩擦損失係数 f を与えることで、構造物表面における水の流動箇所を数値解析により再現できると判断した。

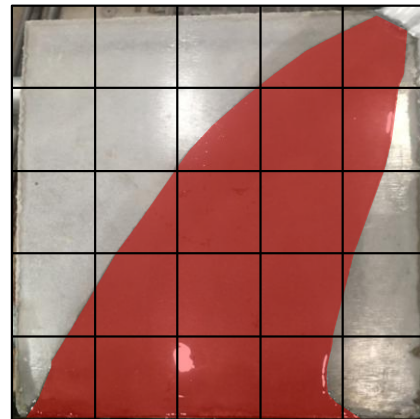


図-5 水の移動箇所実測値(上向き面)

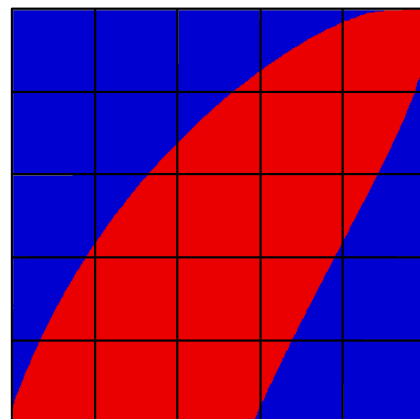


図-6 水の移動箇所解析値(上向き面)

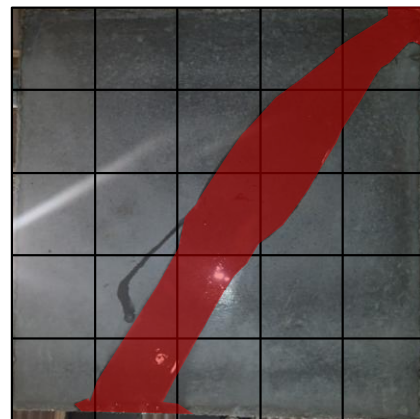


図-7 水の移動箇所実測値(下向き面)

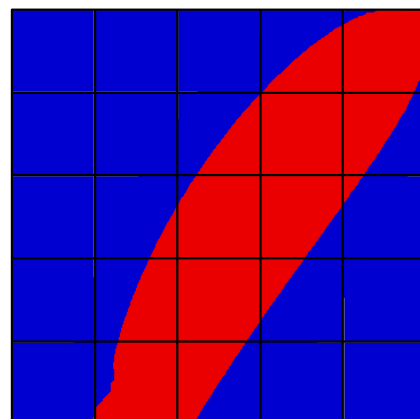


図-8 水の移動箇所解析値(下向き面)

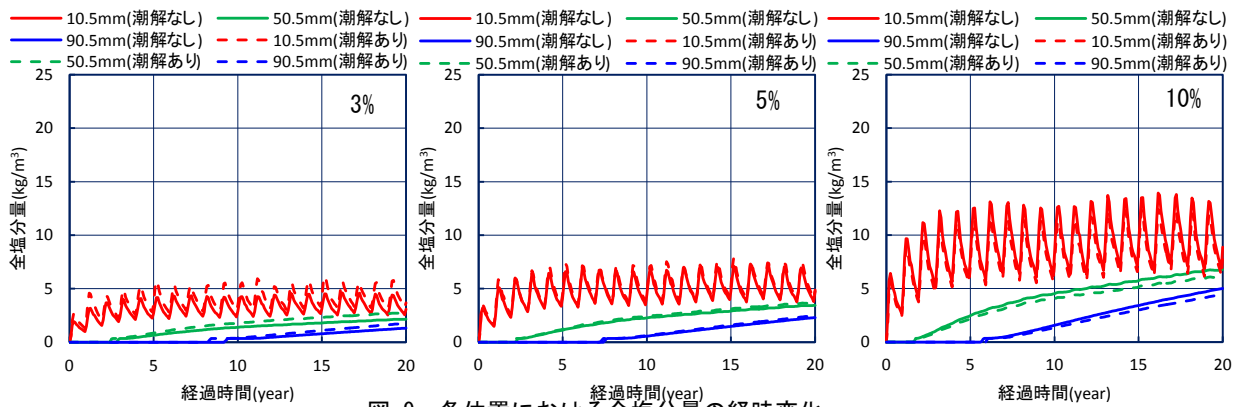


図-9 各位置における全塩分量の経時変化

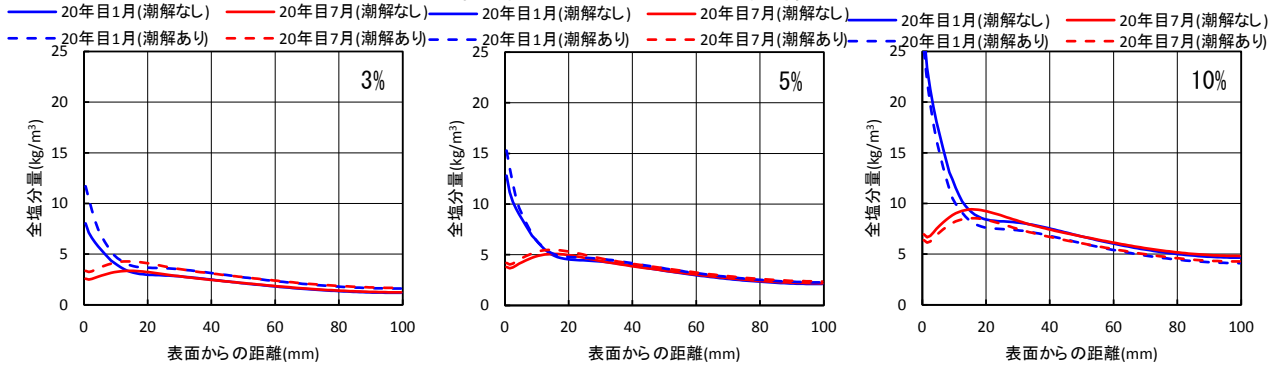


図-10 全塩分量の分布の経時変化

4. コンクリート内部への塩分浸透の長期解析

4.1 解析概要

既報³⁾では、冬季における凍結防止剤とそれ以外の季節における表面の洗い流しの影響を受ける場合の塩分浸透を数値解析により再現した。本報では既往の水分・塩分浸透モデルに潮解の影響を組み込んだので、潮解が塩分浸透におよぼす影響を検討する。

水分と塩分の浸透の解析期間は20年間とした。解析に用いる降雨履歴や温湿度は、新潟市の気象台の2002年1月から2011年12月のデータを20年分に複製したものを用いた。冬季(1, 2, 12月)に表面を流れる水の塩分濃度は凍結防止剤の散布状況等の影響で場所により異なることを考慮し3, 5, 10%NaCl溶液の3水準とした。

潮解は塩化ナトリウムの結晶が表面に存在し、かつ相対湿度が75%以上の場合に発生する。ここでは、表面近傍の塩分浸透量が多い冬季においてのみ潮解を考慮した。すなわち、冬季の不飽和拡散計算時に外気の気温から算出される飽和水蒸気圧を仮想的に0.75倍した値を用い、潮解の発生を判定した。潮解発生時に表面にある水の塩分濃度は高濃度と考えられるため飽和NaCl溶液(26.4%)とした。なお、本来、潮解の判定に冬季、夏季といった季節の区別を介入させるのではなく、構造物表面を流れる水による塩分の輸送、コンクリート中への塩分の浸透の所産としてコンクリート表面に付着する塩分量を求め、これに基づき潮解の判定を行うべきである。これは今後の課題とする。

コンクリートのW/Cは50%とした。塩分浸透の奥行き方向(z方向)の計算範囲は100mmとした。

4.2 結果および考察

解析結果を図-9, 図-10に示す。図-9は表面から深さ方向における各位置の全塩分量の経時変化を示している。図-10は深さ方向の全塩分量の分布の経時変化を示している。いずれの図も実線が潮解を考慮しない場合の結果を破線が潮解を考慮した場合の結果を示し、グラフ中の右上にある%は冬季に流れる水の塩分濃度を示す。

図-9より、潮解の考慮の有無によらず表面近傍の全塩分量は季節的な変動をすることが確認された。図-10より、冬季に流れる塩水の濃度が低い(5%程度まで)場合には潮解により塩分浸透量は多くなるが、塩水の濃度が高い(10%程度)場合には逆に潮解の影響により塩分浸透量が少なくなる結果となった。既往の研究⁴⁾では、凍結防止剤を散布した直後の路面水の塩分濃度は5%程度であり、時間の経過とともに低下するという報告がある。今回の解析ではその範囲では潮解により塩分浸透が促進される結果となったので、潮解の考慮は必要と考えられる。なお、表面を流れる水の塩分濃度が高い場合、潮解を考慮した方が塩分浸透が少なくなる解析結果が得られた理由は、潮解により乾燥しにくくなることにより湿潤時の吸水量に伴う塩分浸透量が少なくなるためである。実際にこのような結果となるかどうかは今後の実験による検証が待たれる。

表-2 A橋傾斜角

	①	②	③	④	⑤
$\theta_x [^\circ]$	172.96	90	178.28	90	173.851
$\theta_y [^\circ]$	-179.58	-179.58	-179.58	-179.58	-179.58

表-3 B橋傾斜角

	①	②	③	④	⑤
$\theta_x [^\circ]$	166.95	90	177.71	90	168.46
$\theta_y [^\circ]$	179.04	179.04	179.04	179.04	179.04

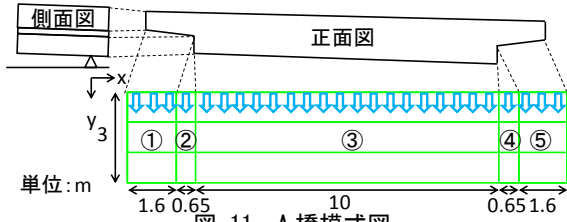


図-11 A橋模式図

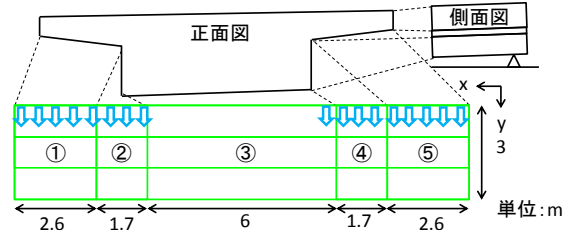


図-13 B橋模式図

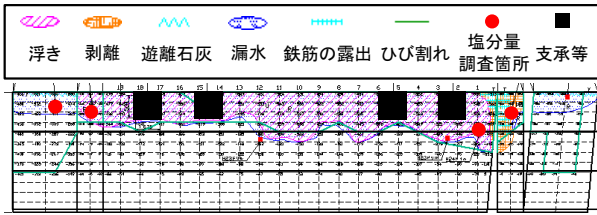


図-12 A橋劣化調査図

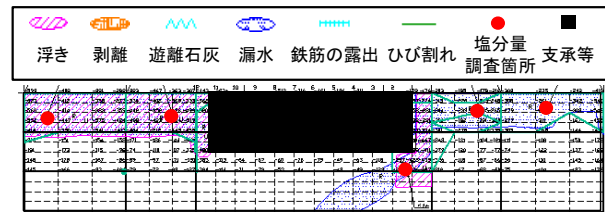


図-14 B橋劣化調査図



図-15 A橋漏水箇所解析結果

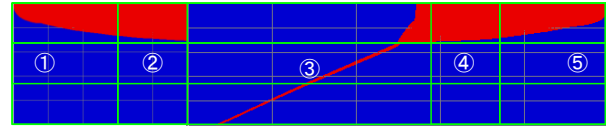


図-16 B橋漏水箇所解析結果

5. 実構造物における表面の水分流動と塩分浸透の再現解析

5.1 解析対象

新潟県の内陸部に供用されている実橋梁を対象として構造物表面の水の流動解析と塩分の浸透解析を行った。解析対象はRC橋であるA橋とPC橋であるB橋の2つの橋梁である。A橋は供用27年目の7月に、B橋は供用28年目の7月に劣化調査が行われた。A橋、B橋を対象に行った橋梁の劣化調査結果のうち表面に水の流れた箇所の分布および各位置における塩分の浸透量を本解析により再現することを目的とする。

解析対象部位は桁端部周辺の下面と側面である。A橋の解析対象部位の展開図を図-11、各面の傾斜角を表-2、点検結果を図-12に示す。B橋の解析対象部位の展開図を図-13、各面の傾斜角を表-3、点検結果を図-14に示す。構造物中の各面の塩分量調査はいずれも漏水痕の範囲内で行われている。

5.2 解析方法

表面の水分流動解析は、桁端部から橋軸方向に漏水が発生したと仮定して行った。すなわち、図-11、図-13に示す矢印の箇所に境界条件として $u=0$, $v=1.0$ [m/s], $h=0.001$ [m]を与え、 $f=2.0$ [1/s]として流動解析を行い定常状態における流水分布を求めた。

水分浸透、塩分浸透の解析では、A橋はRC橋であるため $W/C=55\%$ 、B橋はPC橋であるため $W/C=40\%$ とし

て、細孔構造に基づき物質移動特性を推定した。解析期間は20年間とした。降雨履歴と湿温度は、4章の解析で用いたものと同様である。4章の解析と同様に、潮解は、冬季の不飽和拡散時で相対湿度が75%以上の場合に発生するとし、潮解が発生した時表面から浸透する液状水は飽和NaCl溶液(26.4%)とした。

既報において⁵⁾、構造物表面を流動する水により再分配される塩分の分布は傾斜や流下距離の影響を受けることを実験的に明らかにしている。傾斜が大きくなると表面に付着している塩分の大部分が洗い流され、位置によらず塩分濃度が一律低下するが、傾斜が小さいと一部の水が滞留し、蒸発するため下流の表面塩分濃度が高くなる。この傾向は、表面における水分の流動、表面を流れる水への塩分の再溶解、塩分を含んだ水のコンクリート表面における蒸発をモデル化することにより自動的に表現されることが理想であるが、本研究の段階では構造物の位置によって冬季に流れる塩水の濃度を変化させることで表現することにする。すなわち今回の解析では、A橋、B橋ともに、垂直面である②、④面、および傾斜が比較的小さいが、路面からの排水が桁端部の裏側までに到達する流下距離が短い①、⑤面では、流れる水は5%NaCl溶液とした。①、②面や④、⑤面の表面に付着している塩分を溶解した高濃度の塩水が流れ込み、傾斜が小さく水が滞留すると考えられる③面では、流れる水は25%NaCl溶液とした。

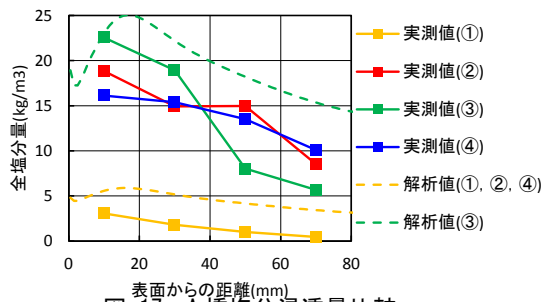


図-17 A橋塩分浸透量比較

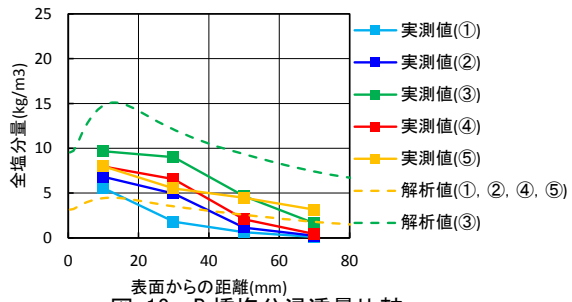


図-18 B橋塩分浸透量比較

5.3 表面の水分流動箇所の解析結果および考察

構造物表面の水分流動箇所の解析結果を図-15、図-16に示す。いずれの図も h が 0.0001m 以上の箇所に水が流れていると判定し、赤色で示している。

図-12、図-15より、A橋の劣化調査図の漏水痕と解析結果の流水箇所を比較すると、解析結果は実橋梁の表面の水の流れを概ね再現できていることが確認できる。

図-14、図-16より、B橋については、解析結果は①、②、④、⑤面の流水箇所を概ね再現できている。③面は、流水箇所の詳細は異なるが、ある角度をもって収束しながら流れていく傾向は再現できている。③面の流水箇所が実測と解析で異なる理由としては、解析では支承等の障害物の影響を考慮していないことが考えられる。

本結果より、適切な境界条件を与えると、数値解析により実橋梁の表面の水分の流れを概ね再現できること、再現精度を向上させるには、流動途中の障害物の有無による流れの変化を適切に考慮する必要があることが明らかとなった。また、解析には水の流入箇所と流入方向の適切な設定が不可欠であるため、精度の高い解析結果を得るには構造物中のどの箇所で漏水が発生するかを把握する必要があるといえる。

5.4 塩分浸透の結果および考察

解析結果と実測値の比較を図-17、図-18に示す。

図-17は図-12に示すA橋の塩分量調査箇所における塩分浸透量の深さ方向の分布の実測値と解析値との比較を示している。図-18は図-14に示すB橋の塩分量調査箇所における塩分浸透量の深さ方向の分布の実測値と解析値との比較を示している。凡例の括弧内の数字は塩分量調査を行った面を示している。実線は実測値を破線は解析値を示している。

図-17、図-18より、A橋とB橋の結果を比較すると、A橋の実測値、解析値ともに全体的にB橋より大きいことが確認された。その理由は、RC橋とPC橋におけるコンクリートのW/Cの差異によると考えられ、このことを考慮した解析により、その傾向が再現されている。しかし、塩分浸透量の定量的な予測精度、場所による塩分浸透性状の違いの再現精度はまだ十分ではないと考えている。また、今回は構造物の場所により表面を流れる塩水の濃度を変えて与えたが、構造物表面を流れる水の蒸

発や表面を付着している塩分の再溶解による分配を表現できるようにすることも今後の課題である。

6 まとめ

- 1) 提案した解析手法により、構造物表面における水分の流動状況の特徴を概ね再現できることが明らかとなった。再現精度の向上には、支承などの障害物による流れの変化を適切に表現する必要があると考えられる。
- 2) 提案した解析手法により、構造物中の漏水が見られた箇所における塩分浸透が再現できることが明らかとなった。構造物中の部位による塩分浸透量の違いを詳細に再現するためには、構造物表面を流れる水による塩分の分配、再分配をメカニズムに則り精密に表現する必要があると考えられる。

謝辞

本研究において、貴重な点検データを提供していただいた東日本高速道路株式会社新潟支社湯沢管理事務所に対して記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 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, pp.831~836, 2002.6
- 2) H. Thynn Thynn and T. Shimomura: Hybrid computational method for capillary suction and nonsaturated diffusion in concrete, Proceedings of the 4th International Conference on Construction Materials (ConMat'09), pp.1075-1080, August 2009
- 3) 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
- 4) 青山實信, 松田哲夫: 凍結防止剤によるコンクリート構造物への塩分浸透性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.807~812, 2004.7
- 5) 下村匠, 福地大樹: 実構造物におけるコンクリート表面の塩分濃度の空間分布に関する検討, 土木学会第66回年次学術講演会講演概要集, V-222, pp.443~444, 2011.9