

## 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

長岡技術科学大学大学院

○原田 健二

長岡技術科学大学

正会員

下村 匠

Abstract : Transport of water on surface of concrete structure influences chloride attack by de-icing agent. When water containing chloride ions contacts concrete surface, water and chloride penetrate into the concrete by capillary suction. On the other hand, flow of water on concrete surface sometimes removes chloride from concrete surface. Therefore, it is important to take into account water flow on concrete surface in estimating position and process of deterioration by chloride attack. This study is conducted to develop numerical simulation method for water flow on surface of concrete structure and chloride ingress into concrete in order to estimate chloride attack by de-icing agent.

Key words : de-icing agent , chloride attack, capillary suction , numerical simulation

## 1. はじめに

積雪寒冷地では冬季に道路の路面凍結を防ぐために凍結防止剤の散布が頻繁に行われている。そのため、山間部においてもコンクリート構造物の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には損傷箇所が路面排水の流れる箇所や伸縮装置部の漏水箇所などで局所的に生じることが挙げられる。これには、構造物表面の水の流れが影響している。凍結防止剤の塩分を含んだ水がコンクリート表面に接したとき、毛細管吸水により水とともに塩分がコンクリート中に浸透する。一方、雨水などにより表面近傍に存在している塩分を流し去ることもある。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の分布は、構造物表面の水の流れと密接な関係があり、構造物中の塩分の浸透箇所や浸透量を評価するにはコンクリート表面の水の流れを正しく考慮することが重要である。

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の浸透を数値解析により再現することで、凍結防止剤による構造物の損傷箇所の推定に資することを目的とする。

## 2. 数値シミュレーション法

## 2. 1 数値解析全体概要

数値解析の概要を図-1 に示す。図-2 のように重力を駆動力とした構造物表面(xy 平面)における水の移動をまず解析し、表面に液状水がある位置では深さ方向(z 方向)に吸水計算を行い、表面が乾燥している位置では z 方向に不飽和拡散計算を行う。いずれの場合も、液状水によるバルク移動と濃度拡散による塩分の移動を計算する。

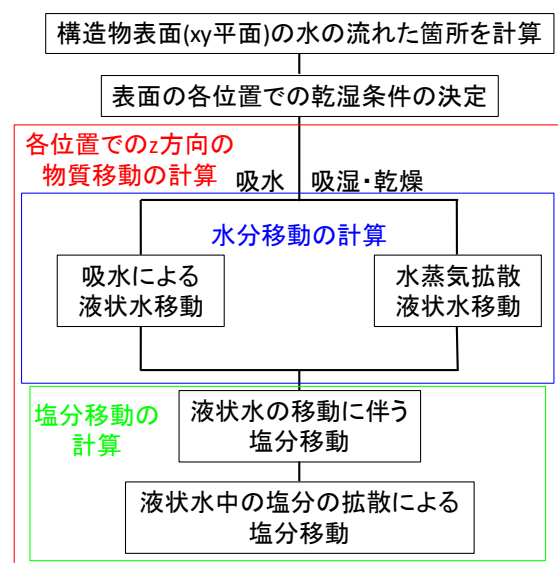


図-1 数値解析概要

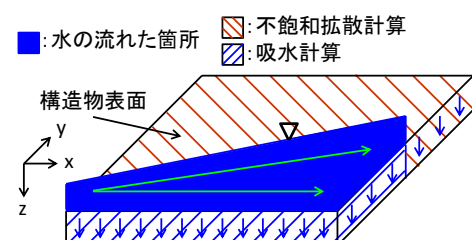


図-2 数値解析イメージ

## 2. 2 構造物表面における水の移動解析

重力を駆動力としたコンクリート表面の水の移動は式(1)～(3)で表される支配方程式の定常解より求める。

(1)は質量保存則，(2)は  $x$  方向の運動方程式，(3)は  $y$  方向の運動方程式である。

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

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

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

ここに， $u$ ： $x$ 方向の速度[m/s]， $v$ ： $y$ 方向の速度[m/s]， $h$ ：構造物表面からの水面の高さ[m]， $\theta_x$ ： $x$ 方向の傾斜， $\theta_y$ ： $y$ 方向の傾斜， $f$ ：摩擦損失係数[1/s]である。

## 2. 3 コンクリート中への水分と塩分の浸透解析<sup>1)</sup>

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吸水現象を考慮する。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， $z$ 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。

(4)は水分の質量保存則，(5)は塩化物イオンの質量保存則である。

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

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

ここに， $w$ ：コンクリート単位体積中の水分量(kg/m<sup>3</sup>)， $J_v$ ：水蒸気の拡散移動流束(kg/m<sup>2</sup>s)， $J_l$ ：不飽和状態における液状水の移動流束(kg/m<sup>2</sup>s)， $J_{cs}$ ：表面からの毛細管吸水による液状水の流束(kg/m<sup>2</sup>s)， $C_{total}$ ：コンクリートの単位体積中の全塩分量(kg/m<sup>3</sup>)， $C_f$ ：液状水単位体積中の自由塩化物イオン量(kg/m<sup>3</sup>)， $\rho$ ：液状水の密度(kg/m<sup>3</sup>)， $J_{difCl}$ ：液状水中の塩化物イオンの濃度拡散流束(kg/m<sup>2</sup>s)

## 3 表面における水の流れと表面塩分の分布に関する実験

### 3. 1 実験概要

供試体にはW/C=40%で28日湿布養生させた500×500×45mmのモルタル板を用いた。供試体は図-3のような方法で作製した。上面は表面が粗く，底面は平滑となる。実験に応じ底面と上面を使い分けた。

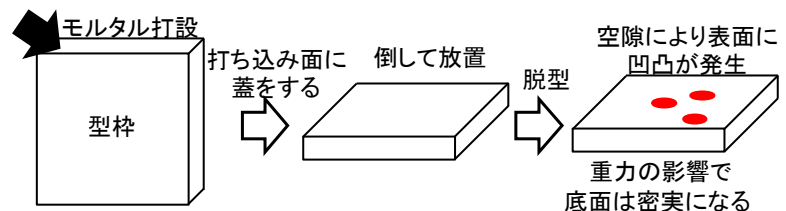


図-3 供試体作成方法

供試体は $\theta_x=0^\circ$ ， $\theta_y=5^\circ$ になるように設置し，図-4で示す方法で水を流した。

コンクリートへの塩分の供給は，平均気温10°，平均湿度40%の室内において4日間供試体を乾燥させた後，3分間25%NaCl溶液を流すことにより行った。その後，4日間乾燥させ，表面塩化物イオン量の測定を行った。

表面塩化物イオン量の測定は，供試体表面に付着してい

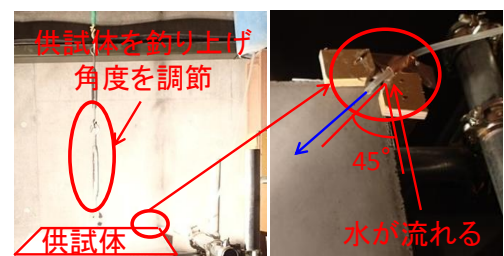
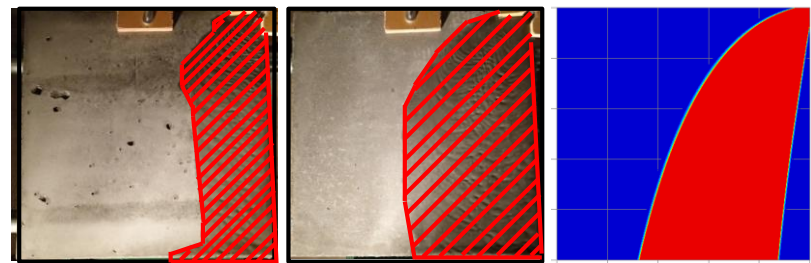


図-4 水の流し方

る塩分を濡れたガーゼで拭き取った後、表面を乾燥させ、その後表面をグラインダで削り試料を採取し、その試料に含まれる塩分を分析することで行った。塩分分析はJCI-SC4「硬化コンクリートに含まれる塩分の分析方法」に基づいて行った。試料は表面を100×100mmメッシュに区切り、メッシュ内に一部でも水が流れた場合、そのメッシュ内から採取した。水が一切流れていない箇所の場合、水の流れていないメッシュの代表点の一つとり、そこから試料を採取した。

### 3. 2 実験結果および解析結果

図-5は実験において観察された水の流れた箇所と、実験条件と同じ境界条件を与えて計算した結果を示している。摩擦損失係数 $f$ は1.0とした。実測値、計算値において赤色で表示されている部分が水が流れた部分である。図-6は図-5実測値(粗い)における100×100mmメッシュの表面塩化物イオン濃度の実測値と計算値を示している。計算値は100×100mmメッシュ内の半分以上の面積において水が流れた場合にはそのメッシュでは吸水が発生していると考え、表面から0.5mmまでの深さにおける全塩分量 ( $\text{kg/m}^3$ ) の計算結果を示している。

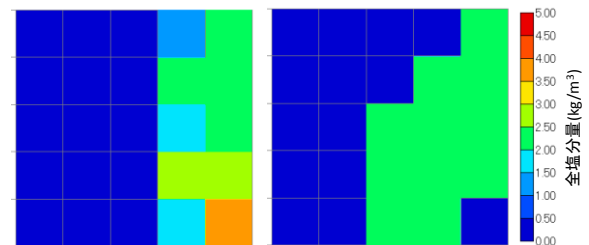


実測値(粗い)

実測値(平滑)

計算値

図-5 水の流れた箇所



実測値

計算値

図-6 表面塩化物イオン濃度

図-6の実測値と計算値を比較すると、実測値(粗い)に関しては水の流れた箇所の計算結果と実測結果との間に違いがみられる。この理由は表面の粗い供試体では表面の一部に凹みがあり、そこでの流れの変化が生じているためである。一方、表面の状態がほぼ平滑である供試体の実測値(平滑)は、水の流れた箇所の計算結果と実測結果が概ね一致している。

図-6 より、メッシュ内の水が流れている面積の大小で表面塩化物イオン濃度が異なることが確認された。実測値と計算値の大きさを比較すると、計算値が実測値を良好に再現しているが確認された。

以上のことより、構造物表面が平滑である場合、適切な境界条件を与えれば、数値解析により構造物表面における水の移動現象を再現できると考えられる。

## 4. 表面の水分移動と各位置における塩分の浸透の統合解析

### 4. 1 解析概要

塩分の浸透解析を計算する橋梁の上部構造を模した構造物形状を図-7に示す。今回の塩分浸透を計算する範囲は緑色で示されている3×4mの範囲である。3°の縦断勾配がある場合とない場合を計算した。

伸縮装置部から漏水が発生し、図-7の赤丸で示している部分からx方向に水が流れると仮定する。すなわ

ち、 $u=1\text{m/s}$ 、 $v=0\text{m/s}$ 、 $h=0.001\text{m}$ を与え、構造物表面の水の流れを計算する。

塩分浸透の解析期間は1992年1月から2011年12月とした。また、解析に用いる環境条件には新潟県の1992年1月から2011年12月までの気象データの月平均のデータを利用した。降雨がある期間は、表面に

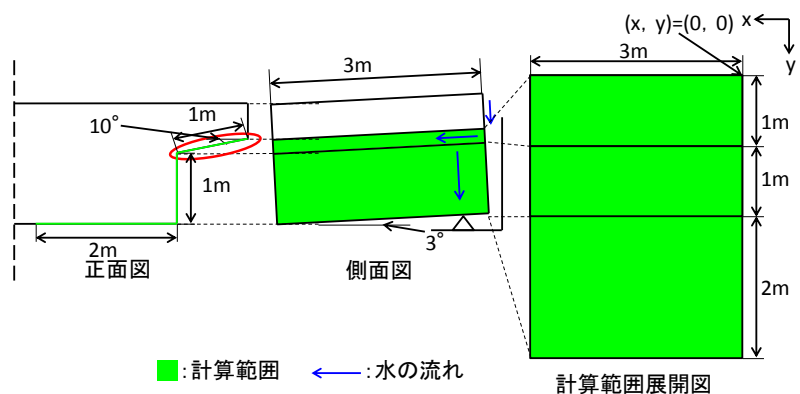


図-7 形状概要

水が流れた箇所では吸水計算を行い、それ以外の場合ではすべて不飽和拡散計算を行う。吸水計算を行う際、冬季(1, 2, 12月)の期間では表面の水は凍結防止剤による5%NaCl溶液として計算を行い、それ以外の期間では表面の水には塩分が含まれていないとする。

## 4. 2 解析結果

図-8は図-7の計算範囲を展開したもので、図中で赤色で表示されている部分が水の流れた箇所であり、数値は原点からの距離(m)を示している。図-9は表面を水が流れる箇所において、表面から深さ方向の各位置における全塩分量の経時変化を示している。図-10は凡例に示す時期における深さ方向の全塩分量の分布であり、季節による全塩分量の分布の変動を示している。

図-8より、縦断勾配の有無により表面の水の流れに明確な差があることが確認された。特に橋軸方向(x方向)の範囲の違いが大きいことが確認された。

図-9、図-10より、表面から近い位置では季節によって全塩分量の値の増減が激しいことが確認された。その理由としては、冬季には塩分を含んだ水の吸水により表面の塩分濃度が高まり、冬季以外では洗い流しと濃度拡散による塩分移動によって表面の塩分が奥行き方向に移動するためであると考えられる。逆にある程度深い位置では全塩分量は季節によらず増加することが確認された。

今回の結果は実際の現象を定性的には表現できていると考えられる。今後は、実構造物における水の流れた箇所やその部分における塩分の浸透量を調査することで数値解析の妥当性を検証する必要がある。

## 5. まとめ

- 1) コンクリート表面が平滑で、傾斜が一様であればコンクリート表面の水の流れる箇所を数値解析により再現することができる。
- 2) コンクリート表面から10mm程度と浅い位置では、冬季における凍結防止剤による塩分の侵入と冬季以外における塩分の洗い流しにより季節によって全塩分量が増減し、ある程度深い位置では全塩分量は季節によらず増加する傾向が、数値解析により再現された。
- 3) 実構造物への適用には実構造物における漏水箇所や塩分の浸透量を調査し、数値解析の結果と比較し検証することが不可欠である。

## 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, pp831-836, 2002

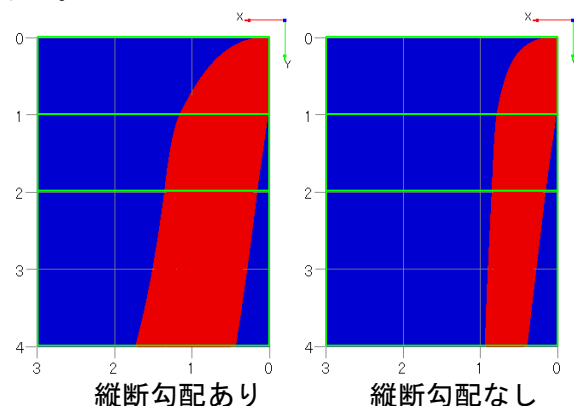


図-8 水が流れる箇所計算値

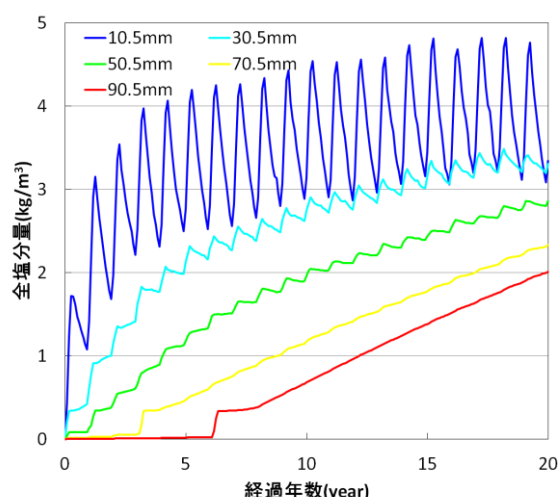


図-9 水が流れる箇所における深さ方向の各位置における全塩分量の経時変化

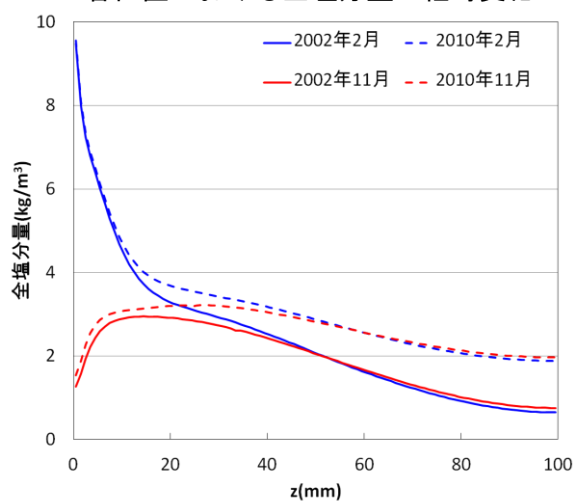


図-10 全塩分量の深さ方向の分布の季節変化