# 構造物表面の水の移動とコンクリート中への塩分浸透の統合数値解析

長岡技術科学大学大学院　　学生員　○原田　健二　正会員　下村　匠

## 1. はじめに

凍結防止剤による塩害の進行には構造物表面の水の流れが影響する．塩分を含んだ水が表面に接すると，毛細管吸水により液状水とともに塩分がコンクリート中に浸透する．一方，雨水がコンクリート表面を流れると表面近傍に存在している塩分を溶解させ，流し去ることで表面近傍の塩分濃度を低下させることもある．このように，コンクリート中への塩分の浸透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移動と，これに伴う構造物表面の各場所における塩分の浸透を数値解析により予測することを目的とする．

## 2. 数値解析概要

### 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解析し，各位置において液状水があるときは構造物の深さ方向(z 方向)に吸水計算を行い，表面が乾燥しているときは 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．

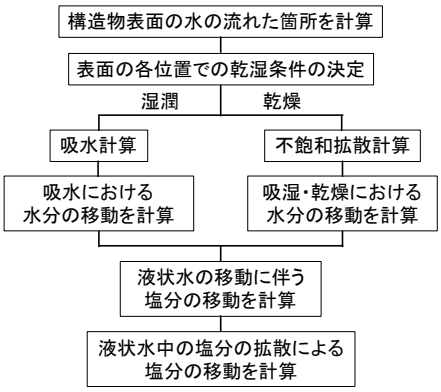


**図-1 数値解析概要**

### 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．

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

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

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

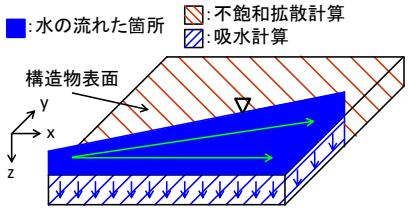


**図-2 数値解析イメージ**

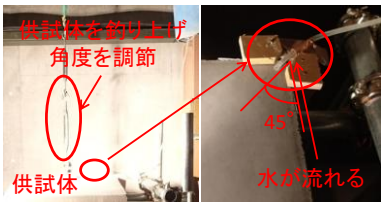


**図-3 実験装置概要**

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 [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 次元解析を行う．

## 3. 実験概要

実験装置を**図-3** に示す．本実験では $\theta x=0°$，$\theta y=5°$ になるように供試体を設置し，**図-3** で示すような方法で水を流した．供試体は 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．

キーワード　塩害，水分移動，塩分移動，数値解析

連絡先　〒940-2188　新潟県長岡市上富岡町 1603-1 長岡技術科学大学 コンクリート研究室
ＴＥＬ0258-47-1611-6310

実験ケースは以下の 2 つを行った．塩水は 25%NaCl 溶液を用いた．

ケース 1：4 日間乾燥→3 分間塩水を流す→4 日間乾燥→表面塩化物イオン量の測定

ケース 2：2 日間乾燥→1 日間塩水浸漬→4 日間乾燥→3 分間真水を流す→1 日間乾燥→表面塩化物イオン量の測定

表面塩化物イオン量の測定は，供試体表面に付着してい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「硬化コンクリート中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を一つとり，そこから試料を採取した．

## 4. 実験結果および解析結果

**図-4** 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 に関しては 1.0 を代入している．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-5** はケース 1 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（kg/m$^3$）の計算結果を示している．**図-6** はケース 2 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．

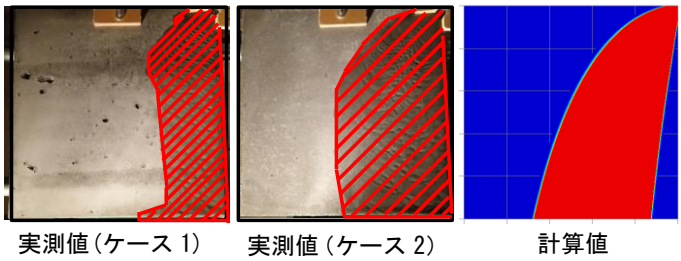


図-4 水の流れた箇所

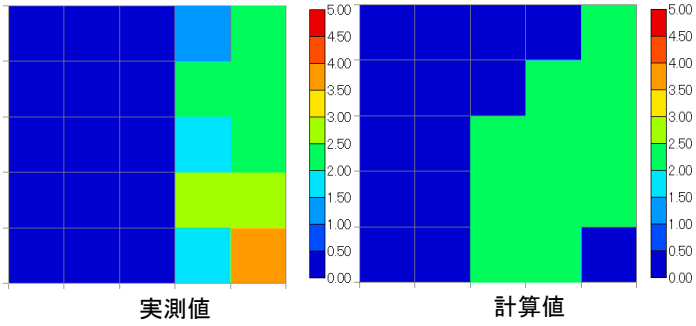


図-5 表面塩化物イオン濃度（ケース 1）

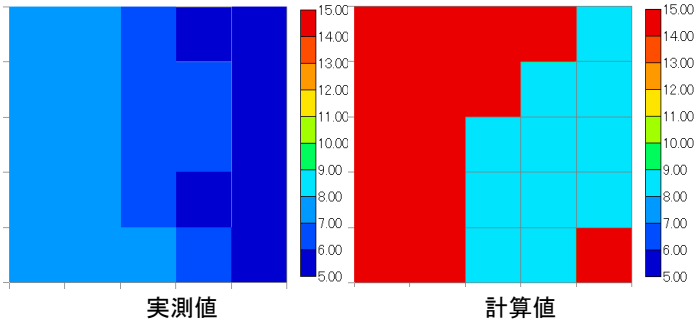


図-6 表面塩化物イオン濃度（ケース 2）

**図-4** の実測値と計算値を比較すると，ケース 1 に関しては計算値は水の流れた箇所の実測値を良好に再現できていない．この理由はケース 1 の供試体表面の一部に凹みがあり，そこでの流れの変化を数値解析で表現できていないことが考えられる．一方，ケース 2 の供試体は表面の状態がほぼ平滑であるため，数値解析の結果と実験において水の流れた箇所が概ね一致している．

**図-5**，**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．これより，構造物表面での水の有無で拡散と浸透を使い分ける計算方法が妥当であると考えられる．実測値と計算値の大きさを比較すると，ケース 1 は計算値が実測値を良好に再現しているが，ケース 2 は計算値が大きい．ケース 2 の計算値が大きい理由は塩水の浸漬の際の吸水計算において吸水量を過大評価し，塩分が過剰に浸透したためと考えられる．

以上のことより，本研究で用いた塩分の浸透の計算方法は適切であることがわかった．しかし，計算値の信頼性向上には長期間の暴露実験を行い，奥行き方向の塩分濃度分布を測定し比較する必要があると考えている．

**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