

# 乾湿繰返しによる塩分浸透予測に対する拡散方程式の適用性について

金沢大学理工学域 学生会員 矢野 峻規 学生会員 橋本 庄一郎 正会員 久保 善司  
西日本高速道路エンジニアリング関西 非会員 橋爪 康憲

## 1. はじめに

凍結防止剤によるコンクリート構造物の劣化が顕在化しつつあり、多量の散布を必要とするケースにおいては、深刻な劣化状態に至るものもある。これらの塩化物イオンの浸透現象は、直接的に高濃度の塩化物イオンを含む溶液が作用するため、その浸透予測手法の確立が重要な課題となっている<sup>1),2)</sup>。既往の検討において、著者らは高濃度の塩化物イオンを含む溶液のコンクリート中への浸透に関する実験(乾湿繰返し実験)を行い、濃度が塩化物イオンの浸透分布に与える影響が大きいことを報告している<sup>3)</sup>。本研究では、上記で得られた浸透直後の浸透分布と一年後の再拡散後の分布について、Fickの拡散方程式の適用性について検討を行った。

## 2. 検討概要

コンクリート供試体(φ100×200mm)はW/C=45%および65%とし、打設1日後、5日間封緘養生を行った。養生後、脱型を行い、検討面(打設面)以外からの水分の出入りを防ぐために側面と底面に塗膜処理を施した。乾湿繰返し試験における塩分濃度は3%および飽和(約26%)とした。乾燥条件(乾燥サイクル)として40°C、30%R.H.の恒温槽に23時間静置した。吸水条件(吸水サイクル)として、所定の濃度の浸漬溶液に検討面を水面下10mmの状態に30分間静置した。乾燥から始め、乾燥および吸水サイクルを1サイクルとして、最大28サイクルまで乾湿繰返しを行った。乾湿繰返し直後のもの、および繰返し試験後の供試体を1年間密封したものを用意した。それぞれの浸透分布を湿式法(JCI-SC5)によって求めた。凍結防止剤を想定した乾湿繰返しによる塩分浸透(浸透直後およびその後の再拡散)について、上記の実験で得られた分布を用いて、Fickの拡散方程式による分布形状の近似(再現性)、および再拡散予測の適用性について検討を行った。

## 3. 乾湿繰返しによる浸透分布の再現性の検討

乾湿繰返しにおける浸透現象は毛細管力による浸透が卓越するため、本来、拡散方程式を適用することはできないが、試行的に拡散方程式(式1)を流用し、乾湿によって得られる塩分浸透分布の再現性について検証することとした。

$$C(x, t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \quad (\text{式 1})$$

ここで、 $C$ : 塩化物イオン量(kg/m<sup>3</sup>)、 $C_0$ : 表面塩化物イオン量(kg/m<sup>3</sup>)、 $D_{ap}$ : 見かけの拡散係数(cm<sup>2</sup>/year)、 $t$ : 時間(year)

この式を用いて、最も実験値に近づくよう適切な $C_0$ と $t$ を与え、試行的に近似曲線を求めた。乾湿による実験値と方程式による近似曲線を図-1に示す。巨視的には拡散方程式による浸透分布(近似値)は、実験値と近い分布を示しているが、2cm以降については実験値との差が必ずしも小さくならなかった。実環境下での凍結防止剤による塩分浸透分布を近似的に得るために、拡散方程式の解を用いた場合、例えば環境条件を考慮し拡散パラメータを設定できたとしても、鉄筋近傍の塩化物イオン濃度の予測を行う上で大きな要因となる2cm以深の予測の精度が良好でない可能性が高い。他方、近似的なパラメータを

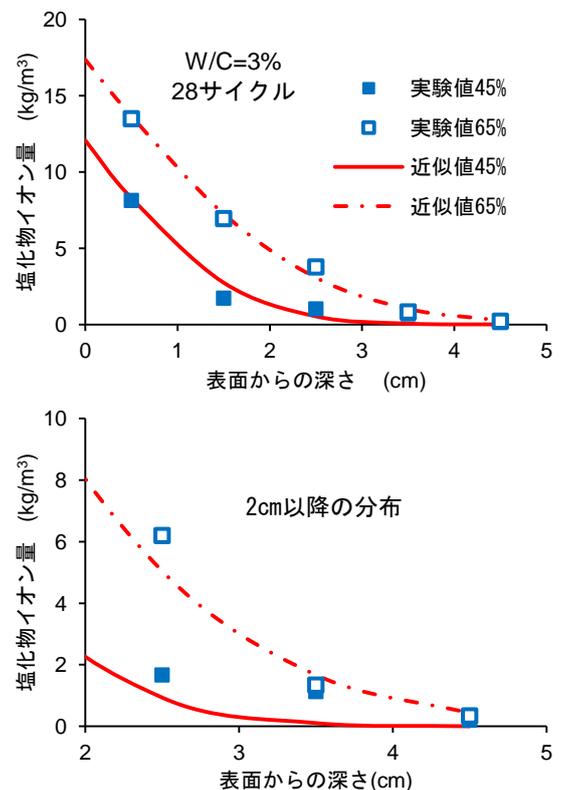


図-1 塩分浸透分布(実験値、近似値)

深部の近似精度を高める方向で検討したところ、表面近傍の近似精度が低下する結果が得られた。

仮に上記の問題がある精度内で解決されると仮定し、環境要因（今回の場合、塩分濃度とサイクル数）に対応するパラメータ決定可能性について検討した。1サイクルを1日として捉えて得られる、「浸透実験による拡散係数」を、「W/Cから求める土木学会式の拡散係数」で除し、その比を求めた（kとする）。

kと表面塩化物イオン量  $C_0$  の関係を図-2に示す。表面塩化物イオン濃度  $C_0$  が高くなると、拡散係数（k）が小さくなる傾向にあるため、水セメント比、サイクル数、塩分濃度などの要因と拡散パラメータとの関係について重回帰分析を行った。結果としては、それらの相関性やパラメータとの関係を統一的に説明するには至らず、現状では凍結防止剤散布における塩分浸透分布を得ることは難しいものと推察された。

#### 4. 乾湿繰返しによる塩分浸透後の再拡散の検討

実環境では、乾湿繰返しによる浸透後には濃度による拡散が生じるものと考えられ、乾湿サイクル直後の浸透分布を初期条件として、差分法によって拡散方程式を解き、1年後の浸透分布を求めた。ただし、拡散係数はW/Cより決定する土木学会式を用いた。また、実験値の塩化物イオンの総量が、サイクル直後と1年後で多少の差があったため、塩化物イオン量が同じになるよう全体を塩化物イオンの総量の比を用いて補正した。実験値と再拡散後の計算値を図-3に示す。

W/C=65%の場合は、実験値と計算値の分布が比較的良く一致した。他方、W/C=45%の場合は、計算値と一致しなかった。そこで、試行的に拡散係数を変え計算してみたところ、W/C=55%の場合に最も一致したものの、深さ2cm未満に差がみられる。水セメント比が高い場合には、塩分浸透後の再拡散は拡散方程式を適用できるものと考えられるものの、水セメント比が低い場合には、その他の要因を考える必要があると考えられる。図-1に示したように、表面近傍と1cmより深部に極端な濃度差が生じていることや、塩分の固定化、含水率分布などの複合した要因によるものと考えられ、これらについては、更なる検討を行い、原因を明らかにする必要があるだろう。

#### 5. まとめ

凍結防止剤散布を想定した乾湿繰返しによる塩分浸透（浸透後の分布とその後の再拡散）について拡散方程式を用いてその分布を予想することを試みた結果、浸透後の分布形状は巨視的には一致するものの、その後の予測に大きく影響する深部の塩分濃度が適切に表現できなかった。また、浸透後の再拡散については、W/Cの低い場合には塩分濃度以外の要因も考慮する必要があることが明らかになった。

#### 参考文献

- 1) 桑原信夫ら：高速道路橋における床版の塩化物イオン浸透予測に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.791-796，2010.7
- 2) 平野誠志ら：凍結防止剤による塩化物イオンの季節変動に関する考察，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.815-820，2010.7
- 3) 久保善司ら：凍結防止剤を想定したコンクリート中への塩分浸透に関する実験的検討，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.67，No.5，pp.181-182，2012.9

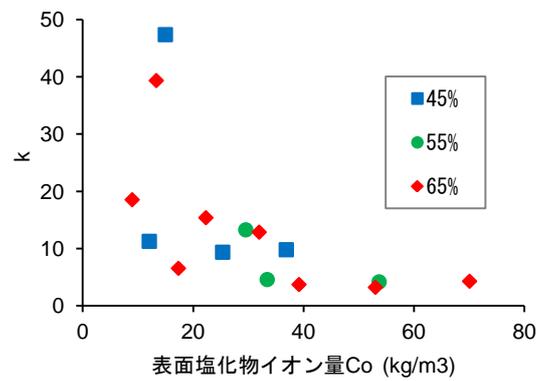


図-2 kと塩化物イオン量の関係

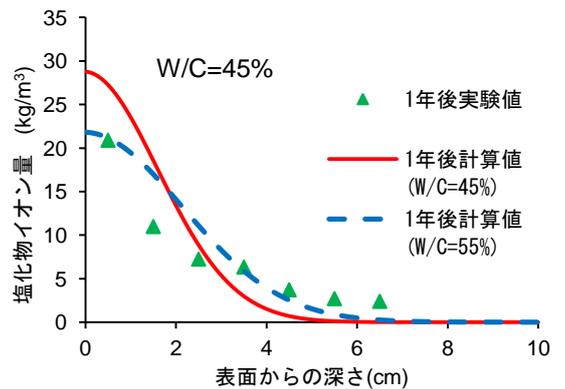
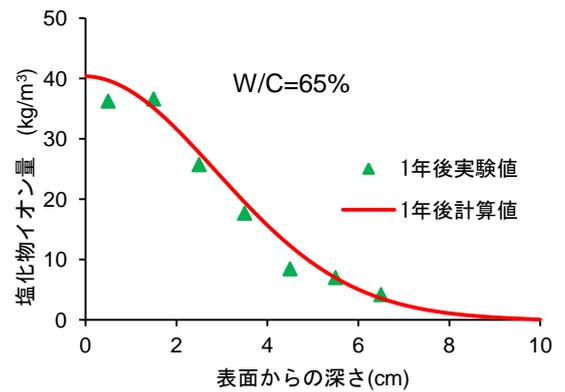


図-3 再拡散予測