

凍結防止剤の散布期間を考慮したコンクリート部材の塩分浸透解析手法

Salinity infiltration analysis method of concrete material that considers scatter period of anti-freezing agents

(株) リテック ○正員 朝倉 啓仁 (Keiji ASAKURA)
 (独) 土木研究所寒地土木研究所 正員 林田 宏 (Hiroshi HAYASHIDA)
 (独) 土木研究所寒地土木研究所 正員 田口 史雄 (Fumio TAGUCHI)
 (独) 土木研究所寒地土木研究所 正員 嶋田 久俊 (Hisatoshi SHIMADA)

1. はじめに

北海道内の道路施設では、スパイクタイヤの販売および指定地域内での使用禁止が法制化された平成3年以降、冬季の路面管理のため塩化物系の凍結防止剤（以下、凍結防止剤という）の散布量が増加¹⁾している。このため、凍結防止剤混じりの雪が堆雪する部位、融雪水が飛散する部位や流下経路となる部位等、すなわち地覆・壁高欄、伸縮装置からの漏水を受ける桁端部の床版、沓座等においては、凍結防止剤から供給される塩化物イオンにより鋼材の腐食が促進される環境にある。

一般に、飛来塩分の影響を受ける既設コンクリート構造物の維持管理においては、コンクリート中の塩化物イオン濃度の測定値を元に、表面塩化物イオン濃度を一定とするフィックの拡散方程式の一般解を用いた回帰分析を行い、腐食予測を行う手法²⁾が広く実施されている。

また、凍結防止剤の影響を受ける場合については、冬季の散布期間に限定して表面塩化物イオンが供給される境界条件の下でフィックの拡散方程式を数値解析する手法³⁾が行われている。

本稿では凍結防止剤の影響を受けた塩化物イオン濃度の測定値に対して、凍結防止剤の散布期間に対応する表面塩化物イオン濃度を境界条件として与え、フィックの拡散方程式を差分法により回帰分析し、表面塩化物イオン濃度および見掛けの拡散係数を算定すると共に、これを用いた腐食予測を行い、フィックの拡散方程式の一般解との比較検討を行った。

この結果、腐食予測においてはフィックの拡散方程式の差分解と一般解とに大きな相違はないものの、精度を上げた解析を行うには散布期間を考慮した差分解を行う必要があることが明らかとなった。

2. 凍結防止剤の散布期間を考慮した塩分浸透解析

差分法を用いたコンクリート部材の塩分浸透解析⁴⁾は、種々の境界条件、初期条件に対応した解析が可能であるが、冬季間限定で散布される凍結防止剤による塩化物イオンの塩分浸透解析においては、表面部の境界条件として散布期間に応じた表面塩化物イオン濃度を考慮するものとする。

(1) 差分法による塩分浸透解析

フィックの拡散方程式を式(1)に、その一般解を式(2)に、差分表示を式(3)(4)に示す。

フィックの拡散方程式

$$\partial c(x,t)/\partial t = D_C \cdot \partial^2 c(x,t)/\partial x^2 \cdots \cdots \text{式(1)}$$

フィックの拡散方程式の一般解

$$c(x,t) = C_0 [1 - \operatorname{erf}(x/(2\sqrt{D_C \cdot t}))] + C_{int} \cdots \cdots \text{式(2)}$$

フィックの拡散方程式の差分表示

$$c(x_m, t_{n+1}) = D_{CT} \cdot r [c(x_{m+1}, t_n) + c(x_{m-1}, t_n)] + [1 - 2D_{CT} \cdot r] c(x_m, t_n) \cdots \cdots \text{式(3)}$$

$$r = \Delta t / \Delta x^2 (\leq 0.5) \cdots \cdots \text{式(4)}$$

ここに、

$c(x,t)$: 全塩化物イオン濃度 ($\text{Cl}^- \text{kg/m}^3$)

t : 経過時間 (年)

x : 表面からの深さ (cm)

$\operatorname{erf}()$: 誤差関数

C_{int} : 初期塩化物イオン濃度 ($\text{Cl}^- \text{kg/m}^3$)

C_0, C_{0T} : 表面塩化物イオン濃度 ($\text{Cl}^- \text{kg/m}^3$)

(添字 T: 凍結防止剤の散布の影響を考慮)

D_C, D_{CT} : 見掛けの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

(添字 T: 凍結防止剤の散布の影響を考慮)

$c(x_m, t_n)$: 深さ $x_m = m \cdot \Delta x (m=0, 1, 2, \cdots)$, 時間 $t_n = n \cdot \Delta t (n=0, 1, 2, \cdots)$ における塩化物イオン濃度 ($\text{Cl}^- \text{kg/m}^3$)

(2) 境界条件

表面部の境界条件である表面塩化物イオン濃度 $c(x_0, t_n)$ は、飛来塩分の様に外部から一定の塩分の供給を受ける場合には表面塩化物イオン濃度 C_0 で与えられるが、凍結防止剤は冬季間（例えば 11 月～3 月の 5 ヶ月間）のみの散布となる。このため、表面部の境界条件を式(5)すなわち図-1 の通り、冬季における凍結防止剤の散布期間を平均した表面塩化物イオン濃度 C_{0T} および散布月数として与える。

$$\left. \begin{aligned} c(x_0, t_n [\text{散布月}]) &= C_{0T} (\text{Cl}^- \text{kg/m}^3) \\ c(x_0, t_n [\text{非散布月}]) &= 0 (\text{Cl}^- \text{kg/m}^3) \end{aligned} \right\} \cdots \cdots \text{式(5)}$$

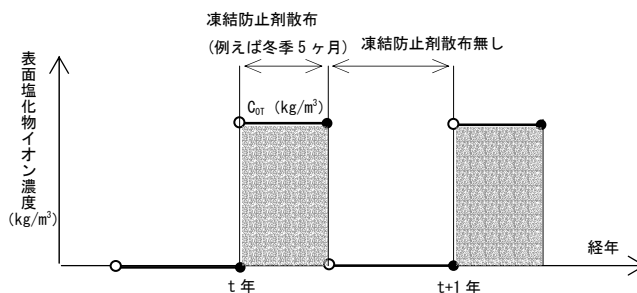


図-1 凍結防止剤散布の影響を受ける表面部の境界条件

凍結防止剤散布の影響を図-1の境界条件で表し、式(3)の差分方程式を式(5)の境界条件の下で塩分浸透解析した事例を図-2に示す。本事例は後出の車道側地覆側面の事例(図3参照)で $t=4$ 年に相当する。

t 年度に着目すると、開始時点 t 年の表面部濃度は前年度の散布無しの影響で低下しているが、その後散布期間である $t+0.1 \sim t+0.4$ 年はフィックの一般解に従い表面 C_{0T} から内部に増加しながら拡散している。非散布期間である $t+0.5 \sim t+1.0$ 年の間は、既に内部に浸透した塩化物イオンが濃度差に応じて拡散し、表面付近では減少し、0.5cm付近以深では増加している様子が分かる。

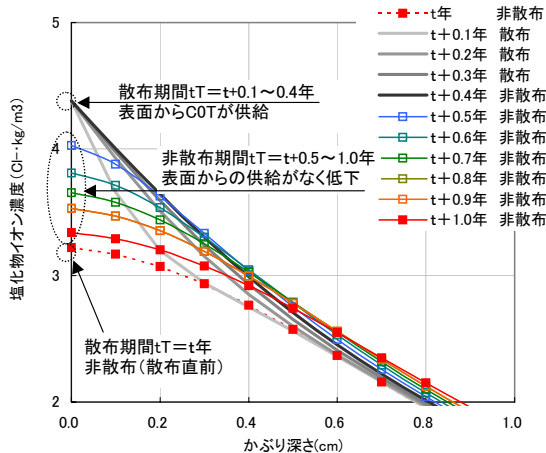


図-2 凍結防止剤散布の影響を受ける表面部の塩分浸透状況

尚、凍結防止剤の影響を受ける表面塩化物イオン濃度については、外部（凍結防止剤が供給される側）とコンクリート表面部の塩化物イオンの濃度差により拡散するとの考え方³⁾もある。これは、凍結防止剤非散布の期間コンクリート表面に水分が滞水する層が存在し、内部に浸透した塩化物イオンが外部に拡散して減少すると考えるモデルである。

本稿では、測定値が外部への拡散の影響等を受けたものであることから、式(3)、(5)に基づく回帰分析から求まる凍結防止剤散布期間の表面塩化物イオン濃度 C_{0T} 、見掛けの拡散係数 D_{CT} を見掛けの値として算定することにより、間接的に外部への拡散の影響等を考慮するものとしている。

(3) 拡散方程式の差分分解による塩分浸透解析—回帰分析と腐食予測—

フィックの拡散方程式の差分分解を用いた塩分浸透解析とは、塩化物イオン濃度測定値への近似を行う回帰分析と腐食予測とからなる。

回帰分析は、散布年数および年間の散布月数が与えられた条件の下、仮定した表面塩化物イオン濃度 (C_{0T})、見掛けの拡散係数 (D_{CT}) から得られる測定時点の塩分浸透曲線と測定値との誤差の二乗和が最小となるように繰り返し計算を行い、最も測定値にフィットする C_{0T} 、 D_{CT} を定める。この際、フィックの拡散方程式の一般解を用いて回帰分析した C_0 、 D_C が初期値を仮定する上で

の一つの目安となる。

次に腐食予測は、差分法による回帰分析から求めた C_{0T} 、 D_{CT} に対して、鋼材かぶり位置における塩化物イオン濃度を Δt 間隔で算定し、鋼材腐食発生限界値 $C_{lim}=1.2\text{kg/m}^3$ となる経年を腐食発生年 $t_f(C_{lim}1.2)$ として求める。

3. 塩化物イオン濃度の測定値を用いた解析事例

飛来塩分の影響のない内陸部において、年間5ヶ月（11月～3月）の凍結防止剤散布の影響を6年間受けた橋台の車道側地覆面および沓座側面から採取したコアの塩化物イオン濃度分布⁵⁾に対して、差分分解および一般解による塩分浸透解析を行った事例を示す。本解析では凍結防止剤散布の11月を経過年数の始まりと仮定している。

調査部位である車道側地覆側面は、凍結防止剤混じりの雪が堆雪したり路面水が飛散する箇所であり、凍結防止剤の影響が比較的高い箇所である。また沓座側面は、凍結防止剤混じりの路面水の流下経路となる箇所であり、凍結防止剤の影響が最も高いと予想される箇所である。

尚、架橋地点における建設後6年間の年平均凍結防止剤散布量は約40ton/km/年であり、路面管理水準が高いことから道内でも比較的高い凍結防止剤散布量の多い路線である。

(1) 車道側地覆側面—堆雪・飛散箇所—

凍結防止剤混じりの雪の堆雪や融雪水の飛散を受ける車道側地覆側面における解析条件と結果を表-1、図-2、3に示す。回帰分析における差分分解と一般解との比率は、 $C_{0T}/C_0=1.12$ 、 $D_{CT}/D_C=1.02$ であり、表面塩化物イオン濃度に凍結防止剤の影響が大きく現れることが判る。

腐食予測における差分分解と一般解との比率は $t_f/t=0.94$ であり、凍結防止剤散布により腐食発生経年が早まる結果となる。

(2) 沓座側面—流下箇所—

凍結防止剤混じりの融雪水の流下箇所である沓座側面における解析条件と結果を表-2、図-4、5に示す。回帰分析における差分分解と一般解との比率は $C_{0T}/C_0=1.15$ 、 $D_{CT}/D_C=0.98$ であり、表面塩化物イオン濃度に凍結防止剤の影響が大きく現れることが判る。

腐食予測における差分分解と一般解との比率は $t_f/t=0.98$ であり、凍結防止剤散布により腐食発生経年が若干早まる結果となる。

(3) 腐食発生年の予測結果

フィックの拡散方程式を用いた回帰分析を行い測定値に近似する塩分浸透曲線を描くため、当然ながら経年6年測定時点における鉄筋位置の塩化物イオン濃度は差分分解、一般解ともほぼ同等の値となる。しかし、両者による測定時点以降の腐食予測は上記の堆雪・飛散箇所、流下箇所ともに散布経年が増加すると $tT < t$ 関係の差が大きくなる傾向にある。

これは、通年一定の表面塩化物イオン濃度に対して散

表-1 車道側地覆面(堆雪・飛散箇所)の塩分浸透解析

塩分浸透解析の条件と結果	
解析条件	調査部位：J 橋台車道側地覆面 文献 5)の JRA1① 経過年数：6 年 散布期間：5 ヶ月 塩化物イオン濃度測定値：図-2 参照 初期塩化物イオン濃度：C _{int} =0kg/m ³ 差分条件：Δx=0.1cm Δt=0.005 年 鉄筋かぶり：30mm 鋼材腐食発生限界：C _{lim} =1.2kg/m ³
拡散方程式の 差分	回帰分析 C _{0T} (5ヶ月)=4.38kg/m ³ (1.12) D _{CT} =0.182cm ² /年 (1.02) 腐食予測 t _T (C _{lim} 1.2)=22.6 年 (0.94)
[参考] 拡散方程式の 一般解	回帰分析 C ₀ =3.90kg/m ³ (1.00) D _C =0.179cm ² /年 (1.00) 腐食予測 t(C _{lim} 1.2)=24.1 年 (1.00)
参照図	回帰分析：図-2 参照 腐食予測：図-3 参照

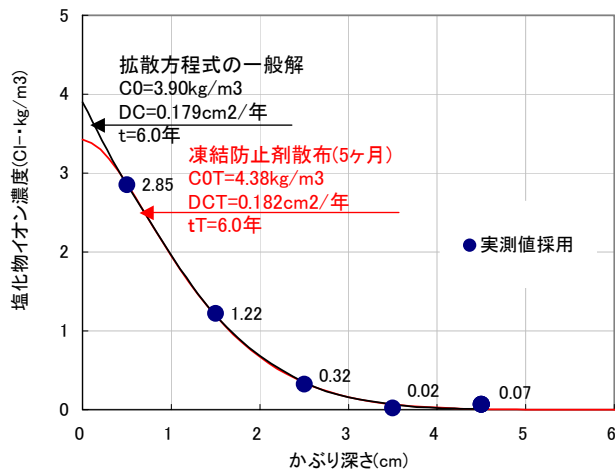


図-2 回帰分析結果（車道側地覆側面）

表-2 沓座側面（流下箇所）の塩分浸透解析

塩分浸透解析の条件と結果	
解析条件	調査部位：J 橋台沓座側面 文献 5)の J④ 経過年数：6 年 散布期間：5 ヶ月 塩化物イオン濃度測定値：図-4 参照 初期塩化物イオン濃度：C _{int} =0kg/m ³ 差分条件：Δx=0.1cm Δt=0.005 年 鉄筋かぶり：70mm 鋼材腐食発生限界：C _{lim} =1.2kg/m ³
拡散方程式の 差分	回帰分析 C _{0T} (5ヶ月)=10.27kg/m ³ (1.15) D _{CT} =0.308cm ² /年 (0.98) 腐食予測 t _T (C _{lim} 1.2)=34.1 年 (0.98)
[参考] 拡散方程式の 一般解	回帰分析 C ₀ =8.96kg/m ³ (1.00) D _C =0.313cm ² /年 (1.00) 腐食予測 t(C _{lim} 1.2)=34.9 年 (1.00)
参照図	回帰分析：図-4 参照 腐食予測：図-5 参照

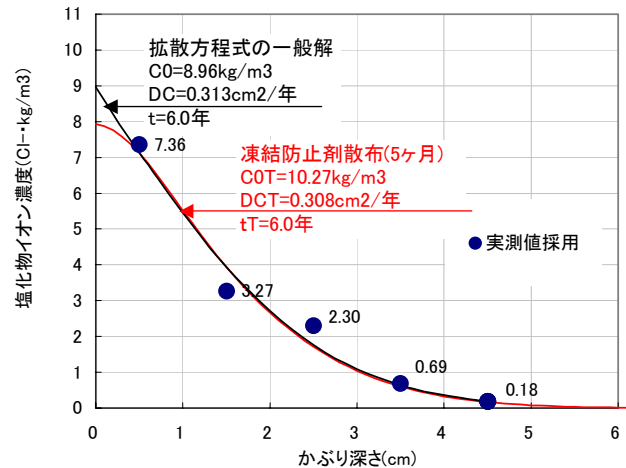


図-4 回帰分析結果（沓座側面）

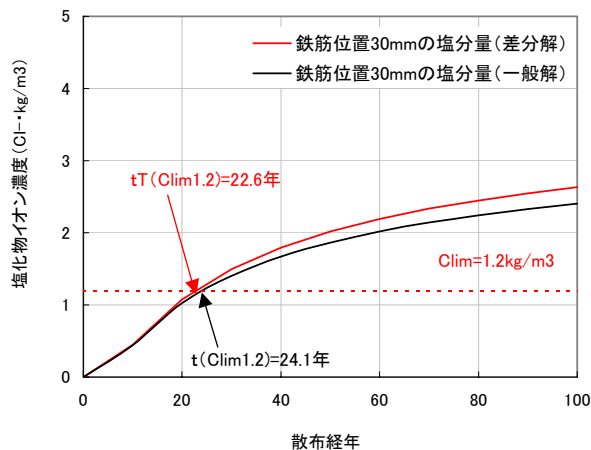


図-3 腐食予測結果（車道側地覆側面）

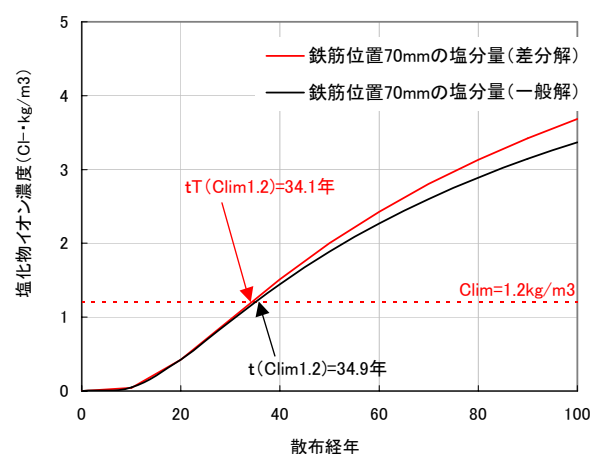


図-5 腐食予測結果（沓座側面）

布期間が限定されるため $C_{0T} > C_0$ となること、さらに非散布期間においても表面付近の高濃度塩分が濃度勾配により内部に移動することから、 $tT < t$ 関係の差が大きくなるものと推定される。

(4) 鉄筋かぶりと腐食発生経年との関係

差分解、一般解による腐食予測は、かぶり 3cm の地覆側面の例では $t_T/t=0.94$ (表-1)、かぶり 7cm の沓座側面の例では $t_T/t=0.98$ (表-2) となっており、腐食発生経年が鉄筋かぶりの大きさの影響を受ける可能性がある。

このため、鉄筋かぶりが腐食発生経年に与える感度分析が必要と判断し、車道側地覆側面 (表-1) および沓座側面 (表-2) の回帰分析結果に 4 種類の鉄筋かぶり (3, 5, 7, 10cm) を考慮した腐食予測を行い、かぶりの大きさが腐食発生経年に与える影響を検討した。

計算結果を表-3, 4 に示す。車道側地覆側面、沓座側面ともかぶりの増加に伴い腐食発生経年は増加するが、両者の差も大きくなり、一般解が腐食開始をより将来に予測する傾向はかぶりが大きいほど影響が大きい結果となった。

また、車道側地覆側面、沓座側面の同一かぶりの腐食発生年に着目すると、例えば 5cm では前者が $t_T/t=0.90$ 、後者が $t_T/t=0.99$ となり、前者の方が凍結防止剤散布の影響を強く受ける結果である。これは見掛けの拡散係数が前者では D_{CT}/D_C (差分解)/ D_C (一般解) $=1.02$ 、後者では $D_{CT}/D_C=0.98$ であることから、 $D_{CT} > D_C$ の場合には塩化物イオンの浸透量が増加することに起因していると思定される。

表-3 車道側地覆側面(堆雪・飛散箇所)の腐食発生年

かぶり	t_T (年) 差分解	t (年) 一般解	t_T/t 差分/一般	備考
3cm	22.6	24.1	0.94	表-1 に同じ
5cm	58.8	67.1	0.90	
7cm	100 超	100 超	---	
10cm	100 超	100 超	---	

表-4 沓座側面(流下箇所)の腐食発生年

かぶり	t_T (年) 差分解	t (年) 一般解	t_T/t 差分/一般	備考
3cm	6.5	6.4	1.02	
5cm	17.6	17.8	0.99	
7cm	34.1	34.9	0.98	表-2 に同じ
10cm	67.5	71.2	0.96	

(5) 塩分浸透解析結果の考察

凍結防止剤散布の影響として、堆雪・飛散箇所である車道側地覆側面、および流下箇所である沓座側面の 2 箇所に着目し、塩化物イオン濃度の測定値を用いてフィックの拡散方程式の差分解と一般解との解析的検討を行った。以下に考察を述べる。

- 1) 凍結防止剤の影響を考慮した塩分浸透解析は、表面部の境界条件を散布期間の表面塩化物イオン濃度と

非散布期間で与えることにより、差分法を用いて解析することが出来る。

- 2) 凍結防止剤散布期間の表面塩化物イオン濃度 C_{0T} は散布期間が限定されることから、表面塩化物イオン濃度を一定とした C_0 より大きい値 (5 ヶ月散布の検討ケースでは 1.12~1.15 倍) となった。
- 3) 凍結防止剤散布の見掛けの拡散係数 D_{CT} は表面塩化物イオン濃度を一定とした D_C とほぼ同等の値 (検討ケースでは 0.98~1.02 倍) となった。
- 4) 凍結防止剤散布の腐食発生経年は表面塩化物イオン濃度を一定として評価した場合より早まる可能性 ($t_T < t$) があり、この傾向は鉄筋かぶりが大きいほど大きく、また $D_{CT} > D_C$ の場合に大きくなった。

4. おわりに

凍結防止剤散布の影響を受ける既設構造物の鋼材腐食発生時期を測定値から予測する塩分浸透解析手法を示すと共に、建設後 6 年間に渡り凍結防止剤散布の影響を受けた測定値に対する検討を行った。

堆雪・飛散箇所および流下箇所の検討ケースにおいては、凍結防止剤散布の影響を受ける実構造物の腐食発生経年を予測する場合、フィックの拡散方程式の差分解と一般解とに大きな相違はないため、表面塩化物イオン濃度を一定とする一般解で将来予測が可能である。しかし、若干危険側の評価となることも想定され、精度を上げた解析を行うには散布期間を考慮した差分解による将来予測が必要である。

また、凍結防止剤の散布期間を考慮した本塩分浸透解析は、現時点ではフィックの拡散方程式を用いた解析が可能となった段階であり、今後経時的な塩化物イオン濃度の測定を行い浸透予測の推定精度を向上させる必要がある。

参考文献

- 1) 北海道土木技術会コンクリート維持管理小委員会：北海道におけるコンクリート構造物維持管理の手引き (案)，p2-34，2006.3
- 2) 土木学会：2001 年制定コンクリート標準示方書 [維持管理編]，p101，2001.1
- 3) 横山和昭，稲葉尚文，山根立行：凍結防止剤によるコンクリート構造物への塩分浸透の予測手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，2006.7
- 4) 朝倉啓仁，田口史雄：差分法による数値解析を用いたコンクリート部材の塩分浸透解析，平成 16 年度土木学会北海道支部論文報告集第 61 号，V-15
- 5) 小尾稔，田口史雄，嶋田久俊：路面凍結防止剤がコンクリート橋の塩害，凍害に及ぼす影響，寒地土木研究所月報，No.635，2006.4