

論文 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

横山 和昭*1・稲葉 尚文*2・山根 立行*3

要旨：積雪寒冷地域の高速道路に散布された凍結防止剤は、床版上面への残留や伸縮装置付近の漏水などにより床版上部や桁端および壁高欄などのコンクリート構造物の表面に塩化物が付着し内部に浸透する場合がある。本研究では、凍結防止剤によるコンクリート構造物への塩化物イオンの浸透に関する予測手法について実構造物の調査結果を用いて検討し、フィックの拡散方程式に基づく差分方程式を用いて塩分浸透予測モデルを構築した。

キーワード：塩害、凍結防止剤、塩化物イオン濃度、浸透予測

1. はじめに

積雪寒冷地域の高速道路の路面に散布された凍結防止剤（融雪剤）の大部分は融雪水として水路等より流出するが、床版上面への残留や伸縮装置付近の漏水などにより床版上部や桁端および壁高欄などのコンクリート構造物の表面に塩化物が付着し内部に浸透する場合がある。

床版上面から浸透した塩化物により床版内部の鉄筋が腐食することによる床版の塩害は舗装路面におけるポットホール等の損傷を誘発するため道路管理者にとって深刻な問題であり、損傷が顕著な場合には床版の取替えを行っている事例¹⁾もある。

また、桁端部や壁高欄に付着した塩化物による塩害は部分的な変状ではあるが、鉄筋の腐食や断面欠損が激しい場合は塩分浸透部分のコンクリートを除去した後に断面修復を行っている事例²⁾がある。

このような凍結防止剤によるコンクリート構造物の劣化に対して、日本コンクリート工学協会では「融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会」（平成9年～平成11年）を設立し、融雪剤（凍結防止剤）によるコンクリート構造物の劣化状況を把握し、劣化の発生を防ぐための対策を提言している³⁾。しかし、融雪剤の

コンクリート中への浸透予測については、一様あるいは局部的浸透の違いの取り扱いや境界条件（表面濃度や散布量）の設定方法等、解決すべき課題が多いことが指摘されているが、その後、浸透予測に関する調査や研究事例は少ないのが現状である。

一方、海からの飛来塩分による塩害については、コンクリート中の塩化物イオンの浸透に関する解析手法の研究が数多くなされており、土木学会・コンクリート標準示方書では、コンクリート表面における塩化物イオン濃度を海岸からの距離に応じて設定し、塩化物イオンの侵入の予測式としてフィックの拡散方程式を用いて鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値を求める式が提示されている⁴⁾。

しかし、凍結防止剤による塩害について実構造物を対象とした塩分浸透予測手法に関しては、前述したように局部的浸透の違いの取り扱いや境界条件（表面濃度や散布量）の設定方法が不明確であるため、土木学会・コンクリート標準示方書を準用して検討した研究事例⁵⁾が報告されてはいるが、未だ確立されていないのが現状である。

本研究では、フィックの拡散方程式に基づく差分方程式を用いて塩分浸透予測モデルを構築

*1 中日本高速道路（株）中央研究所 道路研究部橋梁研究室 工修（正会員）

*2 中日本高速道路（株）中央研究所 道路研究部橋梁研究室主任 工修（正会員）

*3（株）建設技術研究所 東京本社 社会システム部アセットマネジメント室主任 工修（正会員）

し、凍結防止剤を散布している実構造物のコンクリート内部における塩化物イオン濃度の調査結果と比較を行うことによって予測モデルの精度の確認を試みた。

2. 凍結防止剤による塩分浸透の予測手法

2.1 塩分浸透予測式

凍結防止剤による塩分浸透の予測モデルは、以下に示す(1)~(3)の仮定に基づき、予測条件として、外部からの塩分供給は冬期に限られ、コンクリート内部では年間を通じて塩化物イオンが濃度差により拡散し、境界部では外部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ものと想定し、フィックの拡散方程式である式(1)に基づき差分方程式へ展開した式(2)を用いて予測するものとした。

(1)外部からの塩分供給は凍結防止剤を散布する冬期の4ヶ月に限定する。

(2)コンクリート内部では年間を通して塩化物イオンが濃度差により拡散する。

(3)境界面では外部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し、外部方向へ拡散する場合の拡散係数をコンクリート内部へ拡散する場合の係数の1/6とする⁶⁾。

$$\frac{\partial f}{\partial t} = D \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \quad (1)$$

式(1)を展開し、

$$f(x,t+\Delta t) = f(x,t) \left(1 - 2Dc \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \right) + \{ f(x-\Delta x,t) + f(x+\Delta x,t) \} Dc \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (2)$$

ここに、

$f(x,t)$: 深さ x (cm)、時刻 t (日)における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

$f(0,t)$: 表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

$f(0,t:\text{冬期}) = C_0$, $f(0,t:\text{冬期以外}) = 0$

Dc : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{日}$)

2.2 表面の塩化物イオン濃度および見かけの拡散係数の算定

凍結防止剤を散布している橋梁の床版上面および桁下等からドリル法により試料を採取し、JIS A 1154 に準拠して塩化物イオン濃度を測定した。測定データ数は、RC部材 75箇所、PC部材 14箇所であり、複数の測定結果のある部材については安全側の評価となるように表面の塩化物イオン濃度 (C_0) が最大となるものを代表データとして選定し、43箇所を分析対象とした。

分析対象とした塩化物イオン濃度の調査結果を表-1に示す。この調査結果を用いて、図-1に示すように深さ方向の各調査結果に対して誤差の2乗和が最小となる表面の塩化物イオン濃度 (C_0) および見かけの拡散係数 (Dc) を式(2)に基づき繰り返し計算により算定した。

表-1 塩化物イオン濃度の調査結果

No	調査位置	平均散布量 (ton/km)	調査年 (供用後)	調査位置の塩分量(kg/m ³)			
				0~2cm (*0~3cm)	2~4cm (*3~6cm)	4~6cm (*6~9cm)	6~8cm (*9~12cm)
1	床版上面	6.19	19	3.33	1.87	1.08	0.78
2	床版上面	6.19	19	2.51	1.55	0.11	0.07
3	床版上面	6.19	19	3.17	2.19	1.19	0.44
4	桁下	19.93	30	1.22	1.28	0.43	0.00
5	桁下	19.93	30	0.95	0.72	0.74	0.00
6	主版下面	17.02	22	6.71	5.03	3.44	1.93
7	主版下面	17.02	22	3.05	3.23	2.16	2.14
8	床版上面	19.36	19	4.36	2.64	1.10	0.46
9	床版上面	19.36	19	5.56	3.20	1.33	0.67
10	床版上面	19.36	19	8.40	4.99	2.62	0.92
11	床版上面	19.36	19	3.80	1.06	0.43	0.42
12	床版上面	19.36	19	3.90	2.39	1.21	0.47
13	壁高欄	28.34	11	3.24	4.50	3.00	1.24
14	床版上面	28.34	8	6.59	5.18	2.22	1.12
15	床版上面	28.34	8	4.61	3.68	1.24	0.43
16	床版上面	61.75	8	4.11	3.11	1.03	0.25
17	床版上面	41.6	11	2.80	1.77	0.92	0.42
18	床版上面	41.6	11	5.19	4.75	2.92	1.56
19	主版側面	72.21	23	11.75	6.41	4.70	3.74
20	主版側面	72.21	23	9.88	8.62	4.07	1.46
21	床版上面	6.19	22	1.28	1.02	0.66	0.51
22	床版上面	6.19	18	0.29	0.17	0.12	0.11
23	床版上面	6.19	16	2.00	0.84	0.26	0.03
24	床版上面	6.19	17	2.49	1.61	0.85	0.52
25	床版上面	19.36	35	2.35	0.63	0.19	0.17
26	床版上面	28.34	11	2.22	1.74	1.55	1.14
27	床版上面	28.34	13	1.14	0.59	0.38	0.20
28	床版上面	28.34	11	2.09	1.24	0.46	0.25
29	壁高欄	28.34	11	2.91	5.55	4.93	4.39
30	床版上面	61.8	8	3.35	0.79	0.30	0.20
31	床版上面	61.8	8	0.93	0.78	0.43	0.28
32	床版上面	61.8	8	1.85	0.64	0.24	0.20
33	壁高欄	17.11	29	0.88*	0.53*	0.72*	0.42*
34	壁高欄	17.11	29	0.50*	0.41*	0.23*	0.25*
35	床版上面	17.11	29	0.49*	0.18*	0.14*	0.23*
36	床版上面	17.11	29	0.34*	0.32*	0.20*	0.28*
37	床版上面	10.54	36	1.80*	1.07*	0.071*	0.76*
38	床版上面	10.54	36	2.95*	2.02*	1.40*	1.32*
39	床版上面	14.00	29	1.29*	1.23*	0.75*	0.61*
40	床版上面	37.12	11	6.55	6.55	6.48	5.08
41	床版上面	37.12	11	4.82	4.14	3.80	3.14
42	床版上面	37.12	11	5.12	4.01	2.50	2.15
43	床版上面	37.12	11	11.11	10.70	8.21	7.90

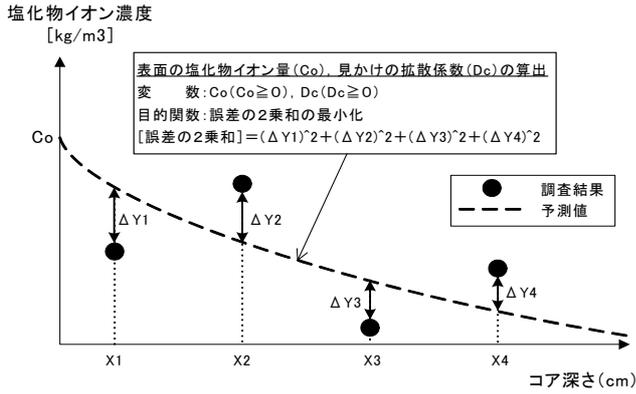


図-1 Co および Dc の推定方法

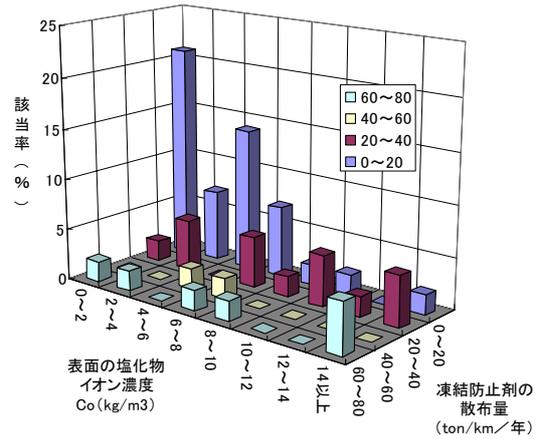


図-2 散布量と表面の塩化物量の関係

2.3 凍結防止剤散布量と Co の関係

凍結防止剤の平均散布量 (ton/km/年) と式 (2) に基づき繰り返し計算により算定した表面の塩化物イオン濃度 Co の関係を図-2, 図-3, 図-4 に整理した。

図-2 は, 凍結防止剤の年間平均散布量 (ton/km) と調査結果より算定した表面の塩化物イオン濃度の頻度分布を示している。

年間平均散布量が 0~20 (ton/km), 20~40 (ton/km), 40~60 (ton/km) 60~80 (ton/km) と大きくなるにつれて表面の塩化物イオン濃度 Co は大きくなる傾向にあった。

また, 同程度の散布量において, Co 値は広い範囲に分散しているが, 測定位置の要因 (部材・部位の違い, 縦断・横断勾配など) が大きく影響していると推定される。

図-3, 図-4 に, 床版上面の塩化物イオン濃度調査結果と凍結防止剤の散布量との関係 (図-3) と床版上面以外の関係 (図-4) に分けて整理した。

近似式 1 (床版上面) は, 舗装を透過して床版上面に付着した塩化物の浸透であり, 近似式 2 (床版上面以外) は桁端部の漏水等で桁下面や壁高欄に直接付着した塩化物の浸透であるため, 近似式 1 に比べて近似式 2 の傾きが大きい結果となっている。データ数が少ないために明確な相関関係ではないが, いずれも散布量の増加とともに塩化物イオン濃度も増加する傾向が各々の近似式により確認できた。

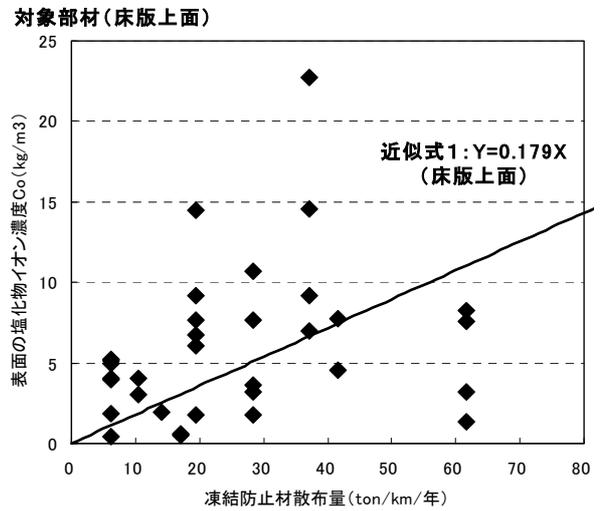


図-3 散布量と Co の関係 (床版上面)

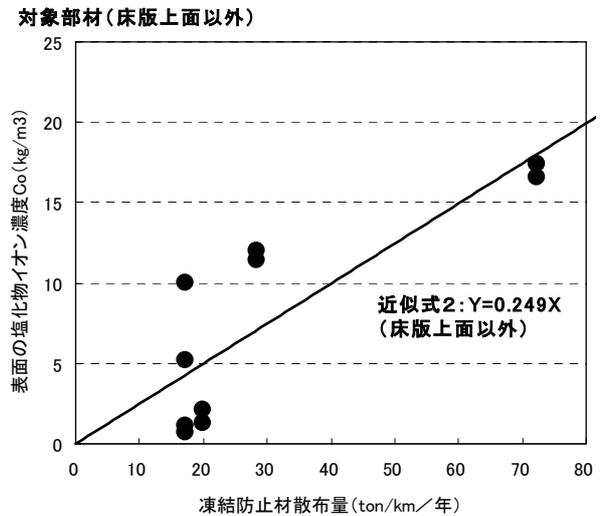


図-4 散布量と Co の関係 (床版上面以外)

3. 凍結防止剤による塩分浸透の予測精度の検証

3.1 調査結果を利用した塩分浸透予測

塩分の浸透予測を行う部材について塩分量調査を行っている場合は、深さ方向の各調査結果に対して誤差の2乗和が最小となる C_0 値および D_c 値を繰り返し計算により算定し、前述した式(2)を用いて今後の塩分浸透予測を行うことができる。

図-10 に塩分浸透予測の一例を示す。対象とした部材（調査 No.17）は、供用 11 年目の RC 床版上面で、年平均散布量は 41.6 (ton/km) である。調査結果より C_0 値および D_c 値を算出し、調査時点の状態を再現計算した後、将来予測を行った。

本研究で提案した予測手法により、調査後の塩分浸透予測をある程度精度良く実施することが可能であると思われるが、追跡調査などを通じて、予測モデルの精査や、表面の塩化物イオン濃度 C_0 および見かけの拡散係数 D_c の経年変化への対応などが必要である。

3.2 調査結果がない場合の塩分浸透予測

塩分の浸透予測を行う部材について塩分量調査データがない場合は、年平均の凍結防止剤の散布量 (ton/km) や、水セメント比 W/C などより、 C_0 値、 D_c 値を推定し、前述した式(2)を用いて塩分の浸透予測を行う必要がある。

表面の塩化物イオン濃度 C_0 は、先に示した図-3 の近似式 1（床版上面の劣化予測に使用）または図-4 の近似式 2（床版上面以外の劣化予測に使用）を用いて、凍結防止剤の散布量より推定し、見かけの拡散係数 D_c は、図-9 の $W/C=0.45$, $W/C=0.55$ それぞれの調査結果の平均値を基に補間または外挿して推定することになる。以上より求めた C_0 値、 D_c 値を前述した式(2)に適用し、各調査年における塩化物イオン濃度 C_x を再現計算し、計算値と実測値を比較することで劣化予測精度を検証した。

図-11 に部材表面より 30mm (20~40mm) の位置における計算値と実測値の比較結果を示す。

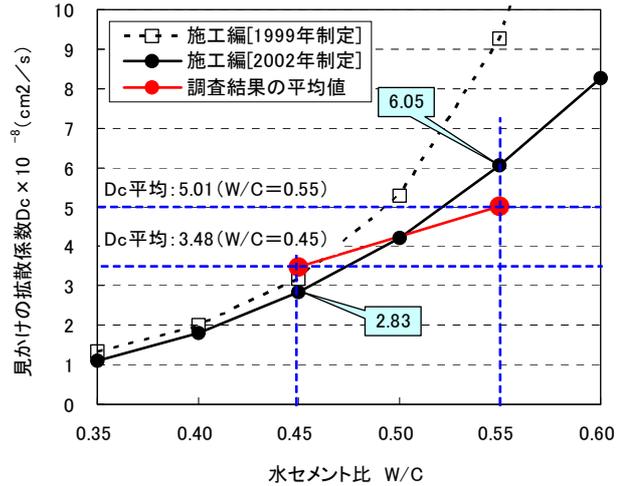


図-9 水セメント比 W/C - D_c の関係

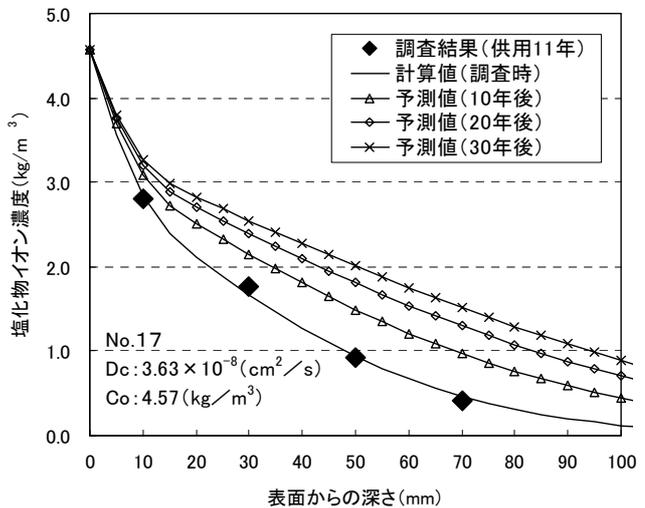
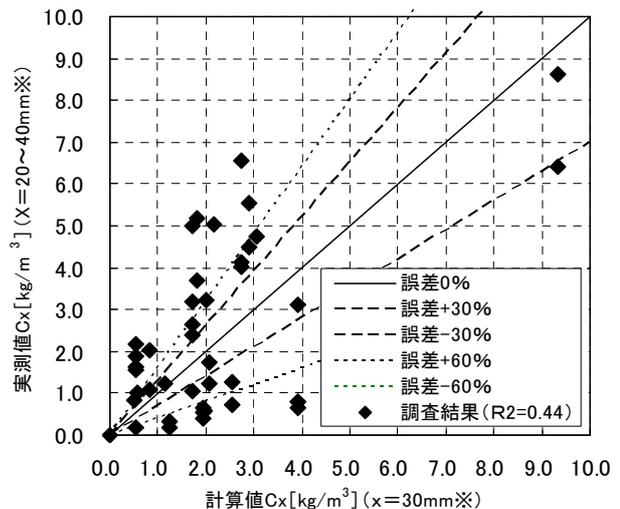


図-10 塩分の浸透予測 (No. 17)



※部材表面より30mm(20~40mm)の調査結果を比較対象とした。
[調査深さの違いにより45mm(30~60mm)を対象としているケース含む]

図-11 塩化物イオン濃度の実測値と計算値

比較結果より，実測値と計算値の誤差は大きい，これは床版防水工の有無や縦断勾配，横断勾配などの影響が要因の一つと推定される。

また，これまで凍結防止剤の影響を受ける期間を固定した分析を行ってきたが，予測精度が十分ではないため，凍結防止剤の影響を受ける散布期間やコンクリート構造物の立地条件および環境条件を変数として塩分浸透予測を行う必要がある。

4. まとめと今後の課題

凍結防止剤を散布している実構造物のコンクリート内部における塩化物イオン濃度の調査結果を分析し，深さ方向の各調査結果とフィックの拡散方程式に基づく差分方程式を用いて算出した塩化物イオン濃度との誤差の2乗和が最小となるように繰り返し計算し，表面の塩化物イオン濃度 (C_0) および見かけの拡散係数 (D_c) を算定する塩分浸透予測モデルを構築した。

本研究で構築した塩分浸透予測モデルを用いて求めた C_0 および D_c に関して得られた知見を以下に示す。

- (1)床版上面と床版上面以外について，年平均の凍結防止剤の散布量と表面の塩化物イオン濃度 C_0 の関係を整理した結果，いずれも散布量の増加とともに塩化物イオン濃度も増加する傾向が確認され， C_0 値は床版上面以外の方が大きい傾向にある。
- (2)本研究で構築した手法により求めた D_c は， W/C が小さくなると低下する傾向にある。また， D_c は，時間の経過とともに低下する傾向にあり， W/C が大きいと低下率も大きくなる。
- (3)本研究で構築した手法により求めた D_c の平均値は，コンクリート標準示方書[施工編]に基づいて求めた D_c の推定値と比較的近い値を示す。

本研究で構築した塩分浸透の予測手法により，塩化物イオン量の調査結果を利用して，凍結防止剤による塩分浸透量の将来予測を行うことが可能であると思われるが，本研究で用いた塩化物イオン濃度の調査データ数は十分ではないため，今後は調査結果の蓄積や追跡調査などを通じて，凍結防止剤の散布量と表面の塩化物イオン濃度 C_0 の関係や見かけの拡散係数 D_c の経年変化への対応などについて検討する必要がある。

また，凍結防止剤の散布期間の違いやコンクリート構造物の立地条件および環境条件を考慮した予測モデルを構築し，より精度の高い塩分浸透予測を行う必要がある。

参考文献

- 1) 関口武一，笹井幸男，石塚喬康：塩害を受けたRC床版の劣化度調査と保全工事，コンクリート工学，Vol.32，No.5，pp.41-49，1994.5
- 2) 藤原博ほか：塩害を受けたコンクリート桁端狭隘部の補修工法—ウォータージェットによるコンクリートはつりと湿式吹付けによる断面修復—，橋梁と基礎，Vol.38，No.12，pp.33-39，2004.12
- 3) 日本コンクリート工学協会：融雪剤によるコンクリート構造物の劣化研究委員会報告書・論文集，1999.11
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，pp.24-28，2002.
- 5) 青山實伸，松田哲夫，野村昌弘：凍結防止剤によるコンクリート構造物中への塩分浸透状況，土木学会第58回年次学術講演会，V-030，pp.59-60，2003.9
- 6) 青山實伸，鳥居和之，松田哲夫：厳しい塩分環境下におけるコンクリート構造物の塩分浸透性に関する実証的研究，土木学会論文集，No.746/V-61，pp.251-264，2003.11