

凍結融解と凍結防止剤の複合作用を受ける道路橋コンクリート部材における塩化物イオン浸透予測の試み

国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 道北支所 ○高田 尚人
 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 寒地技術推進室 川村 浩二
 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 遠藤 裕丈

コンクリート構造物を合理的に維持管理するには、コンクリートの耐久性が時間軸に沿ってどのように低下するかを適切に把握することが大切である。特に寒冷地では、凍結融解と塩化物の複合作用を考慮した評価が求められる。このことに鑑み、本研究では過年度に提案した、凍害を考慮した塩化物イオン浸透予測技術を活用し、北海道の道北地域に立地する既設道路橋下部コンクリートにおいて、凍害の進行を考慮した塩化物イオンの浸透予測を試みた。

キーワード：道路橋、凍結融解、凍結防止剤、塩化物イオン浸透予測

1. はじめに

寒冷地では設置から長い年月が経過し、凍結融解や塩化物等との複合作用によって性能が低下したコンクリート構造物の事例(写真-1)が多い。厳しい財政事情の中でコンクリート構造物の合理的な維持管理・長寿命化を図るには、実態に即したコンクリートの性能評価技術が必要となる。遠藤ら¹⁾は、塩水を用いた屋内でのコンクリートの凍結融解実験の結果等をもとに、凍害を考慮したコンクリートの塩化物イオン浸透予測技術の体系化を図っている。

本研究では、体系化されたこの考え方にもとづき、凍結融解と凍結防止剤の複合作用を受けた道路橋コンクリート部材における塩化物イオン浸透予測を試みた。

2. 凍害を考慮した塩化物イオン浸透予測の考え方

既報でとりまとめられた、凍害を考慮した塩化物イオン浸透予測の体系を図-1¹⁾に示す。はじめに、塩化物イ



写真-1 凍害を受けたコンクリート構造物の一例

オン拡散係数に影響を及ぼす凍害について、その進行予測を行う必要がある。凍害の進行予測は、次式により行うことができる²⁾。

$$SC = a_1 e^{b_1 \log \frac{cyc}{A}} \quad (0 < cyc < B) \quad (1)$$

$$SC = a_2 e^{b_2 \log \frac{cyc-B}{A}} + a_1 e^{b_1 \log \frac{B}{A}} \quad (cyc \geq B) \quad (2)$$

$$RE_d = 100e^{-c \cdot cyc^d} \quad (\text{欠損に至るまで}) \quad (3)$$

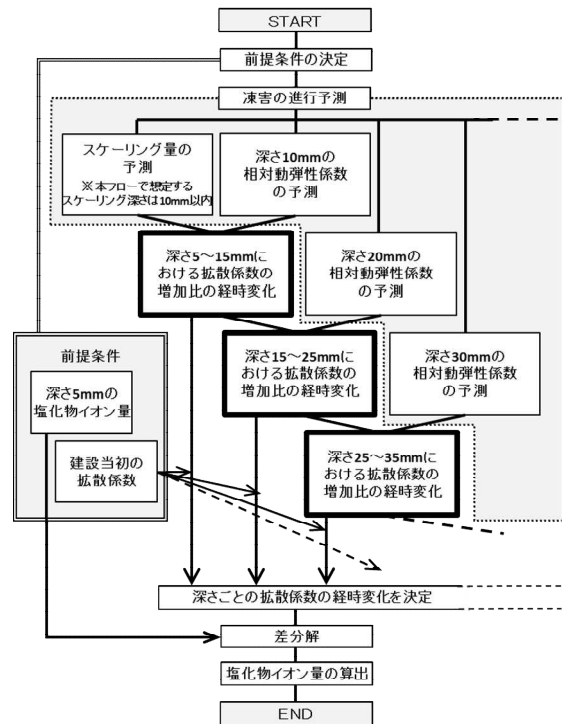


図-1 凍害を考慮した塩化物イオンの浸透予測の体系

ここに、SCはスケーリング量(g/cm²)、RE_dは相対動弾性係数(%), cycは凍結融解サイクル、Aはサイクルを無次元化させるための係数(一般に最長サイクルの1/2)、a₁、b₁、a₂、b₂、c、dは係数、Bは供用開始からスパイクタイヤ使用規制開始までの間に受けた凍結融解サイクルである。図-2に凍害進行予測の概念を示す。

図-3は凍害の進行に伴う塩化物イオン拡散係数の増加比を深さごとに示したものである。この図に凍害(スケーリング、相対動弾性係数)予測の結果を書き入れることで(例えば、図-4のように)、建設当初の塩化物イオン拡散係数からの増加比の経時変化を把握することができる。これにより、表面から供給される塩化物イオン量を決定することで塩化物イオンの浸透予測が可能となる。塩化物イオン拡散係数が深さごとに経時的に変化する時の塩化物イオン浸透予測は、次式³⁾を活用することで比較的簡易に行うことができる。

$$C_{m,n+1} = D_{m,n} \cdot r(C_{m+1,n} + C_{m-1,n}) + C_{m,n}(1 - 2D_{m,n}r) \quad (4)$$

$$r = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad \left(\text{ただし } D_{m,n} \cdot r \leq \frac{1}{2} \right) \quad (5)$$

ここに、C_{m,n}は時間t_n(年)における深さx_m(cm)の塩化物イオン量(kg/m³)、rは係数、Δtは時間tのきざみ幅(t_n=nΔt)、Δxは深さxのきざみ幅(x_m=mΔx)、D_{m,n}は時間t_nにおける深さx_{m-1}~x_m間の塩化物イオン拡散係数(cm²/年)である。

このように、コンクリート表面から表層(深さ0~10mm)へ侵入する塩化物イオン量(図-1では「深さ5mmの塩化物イオン量」と記載)、建設当初の塩化物イオン拡散係数、そして前述したスケーリング量および深さごとの相対動弾性係数の予測から求まる深さごとの塩化物イオン拡散係数の増加比が決定することで、凍害を考慮した塩化物イオン浸透予測を行うことが可能となる。

なお、図-3(上)の横軸はスケーリング量としているが、現場に適用する場合は、これを剥離度⁴⁾に換算した上で、予測を行うことになる。

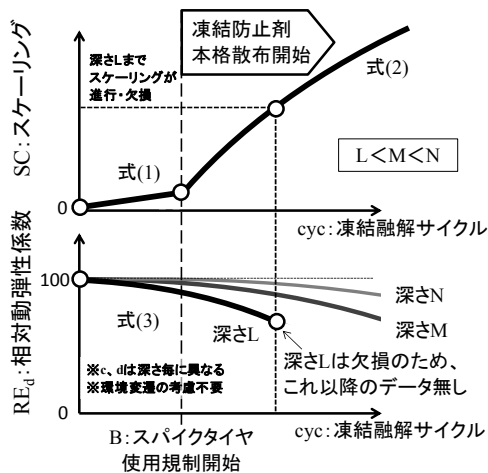


図-2 凍害の進行予測の概念

3. 道路橋における塩化物イオンの浸透予測の試み

過年度に実施した道路橋での調査⁵⁾において取得した

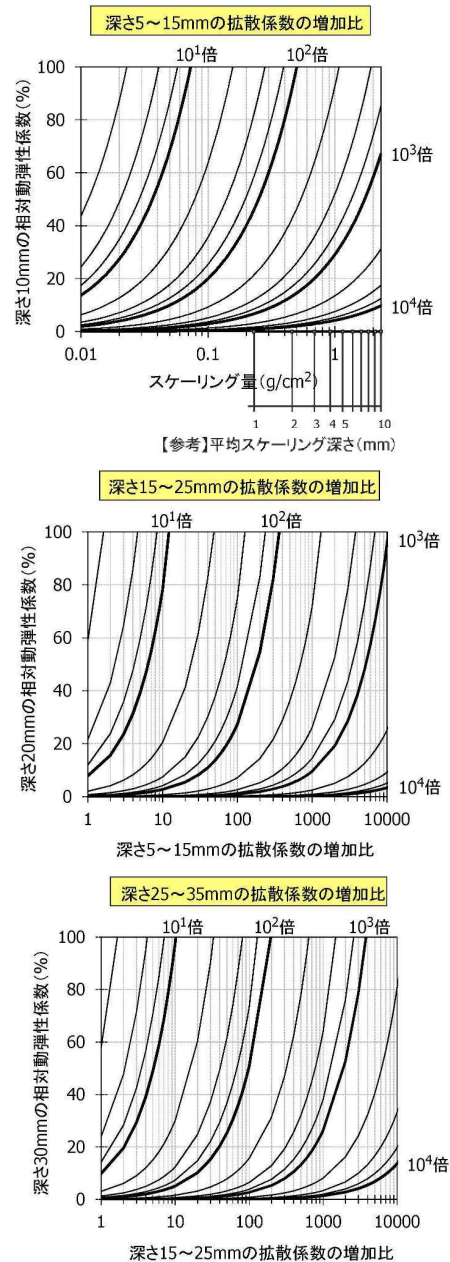


図-3 凍害の進行に伴う深さ5~15、15~25、25~35mmにおける塩化物イオン拡散係数の増加比の変化

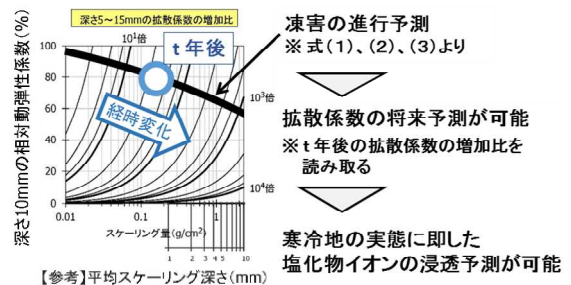


図-4 凍害の進行による塩化物イオン拡散係数の増加比の経時変化の概念

スケーリング、相対動弾性係数および塩化物イオン量のデータを活用し、前述の考え方にもとづいて塩化物イオン浸透予測を試みた。

(1) 過年度に実施した現地調査の概要⁵⁾

図-5に凍害危険度マップ⁶⁾と調査橋梁を示す。凍害危険度は長谷川⁶⁾が日本全国にある気象官署のデータをもとに、凍害が発生する危険性を地域毎に1～5の5段階で表したものである。数値の大小で凍害の予想程度の大小を示しており、凍結融解作用の厳しさの目安となる。

ここでは、立ち入り可能で凍害の程度が比較的大きい9橋を調査橋に選定した。選定した道路橋はいずれも凍害危険度4～5に位置し、冬期は凍結防止剤が散布されている。調査対象は橋台とした。外見上、凍害の程度が最も大きい部位を調査箇所を選定し、剥離度、相対動弾性係数および塩化物イオン量の測定を実施した。

剥離度はスケーリングに相当する指標である。室内実験では剥離片の質量をもとにスケーリング量を評価するが、実構造物では剥離片の採取が不可能である。このため前述したように、式(6)に示す剥離度⁴⁾により、スケーリングの程度を評価した。

$$D_m = D \times A_s = D \times \frac{S}{50 \times 50} \quad (6)$$

ここに、 D_m は剥離度(mm)、 D は平均剥離深さ(mm)、 A_s は測定範囲(50×50cm)に占めるスケーリング面積の割合、 S は測定範囲におけるスケーリング面積(cm²)である。

スケーリングが測定範囲全体に発生している場合は、平均剥離深さが剥離度となる。ここでは式(1)、(2)のSCを D_m 、現場における凍結融解サイクル数の把握が極めて難しいことから、計算を簡便に行うためcycを年数 t に置き換え、さらに、図-3の横軸に【参考】として示している平均スケーリング量を剥離度を読み替えた上で予測を行うこととする。また、評価を安全に行う理由から、凍結防止剤散布前はスケーリングが発生していないと仮定し、式(1)、(2)の a_1 、 b_1 をゼロとする。

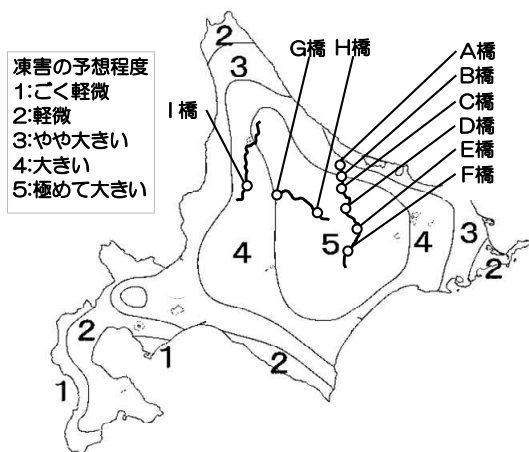


図-5 凍害危険度マップと調査橋梁

写真-2、3に剥離度の測定状況を示す。はじめに、部材表面に50×50cmの枠を据え付け、枠内で剥離深さを10点測定し、その平均(D)を求めた。次に、デジタル画像解析を行って枠内の剥離面積(S)を求め、式(6)より剥離度を求めた。

次に、相対動弾性係数の測定要領を図-6に示す。調査箇所からφ10cm×10cm寸法のコアを採取し、コアの両側面に超音波測定器(周波数28kHz)の発・受振子をあてて剥離面から深さ1、2、3、4、5cmの超音波伝播速度を測定し、式(7)⁷⁾により相対動弾性係数を求めた。

$$\begin{cases} E_{dn} = 4.0387V_n^2 - 14.438V_n + 20.708 \\ RE_d = \frac{E_{dn}}{E_{do}} \times 100 \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 E_{dn} は凍結融解作用を n 年受けた時の動弾性係数(GPa)、 V_n は凍結融解作用を n 年受けた時の超音波伝播速度(km/s)、 RE_d は凍結融解作用を n 年受けた時の相対動弾性係数(%)、 E_{do} は凍結融解作用を受けていない供用直後の動弾性係数(GPa)もしくは供用中のコンクリート構造物において健全とみなせる箇所の動弾性係数(GPa)である。

なお、 E_{do} は供用直後の測定値が不明のため、調査箇所の近傍から健全と思われる深部を含めた形でφ10cm×35cm寸法のコアを採取し、深さ1、2、…、35cmの超音波伝播速度を測定し、最も大きな速度から求めた E_{dn} (式(7))を E_{do} とすることとした。相対動弾性係数についても前述の剥離度と同様、式(3)のcycを年数 t に置き換えて予測を行うこととする。

塩化物イオン量の測定は、JIS A 1154に準じて行った。調査箇所からφ10cm×6cm寸法のコアを採取し、コンクリートカッターを使用して剥離面から深さ0～1cm、1～2cm、2～3cm、3～4cm、4～5cmの部分に切り分け、各スライス片に含まれる全塩化物イオン量(以下、塩化物イオン量と記す)を測定した。



写真-2 剥離度調査状況 写真-3 剥離深さ測定状況

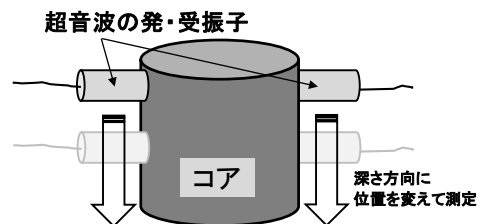


図-6 相対動弾性係数測定要領

表-1に調査結果を示す。塩化物イオン量は調査した全ての深さについて調べているが、一部の欄が空白になっている。この理由は後述する。

(2) 塩化物イオン浸透予測の方法

2章で述べた一連の計算が自動で行えるエクセルプログラムを作成し、これを用いて凍害の進行を考慮した塩化物イオン浸透予測を行った。

図-7にエクセルプログラムの画面の一例を示す。式(1)~(5)および図-2、3で示した情報をすべて組み込んでおり、供用開始年度、調査年度、調査時の剥離度、相対動弾性係数、塩化物イオン量を入力すると、自動的に剥離度の予測式、相対動弾性係数の予測式、凍害を考慮した深さ毎の塩化物イオン拡散係数が求まり、鉄筋かぶり位置（以下、鉄筋位置と記す）における塩化物イオン量の経時変化が自動的にグラフ化される仕組みとなっている（図-8、ただし、剥離度の式における時間を無次元化させる任意の値Aは、ここでは1としている）。

なお、このエクセルプログラムは、調査時における塩化物イオン量の分布が表面側で大きく、深くなるにつれて小さくなる形を呈していることを適用条件としている。このため中性化や表面の洗い流し、測定値のばらつき等の影響により、この分布を逸脱する形でプロットされたデータは便宜上、無視している（例：表-1の空欄）。

2章の考え方（図-1）は、予測に先立ち、まず深さ5mmの塩化物イオン量と建設当時の塩化物イオン拡散係数を決定し、その後、凍害の進行予測結果をもとに塩化

物イオン拡散係数の増加比の経時変化（図-4）を定めて塩化物イオン拡散係数の経時変化を求め、最終的に塩化物イオン量を算出する流れとなっている。しかし、供用期間が長く、凍害を受けている場合は、建設当初の塩化物イオン拡散係数を把握することが難しい場合もある。

そこで、ここでは図-9に示すように、現時点の塩化物イオン量と、凍害の進行予測の結果から求まる、供用開始から現在に至るまでの塩化物イオン拡散係数の増加比の経時変化をもとに、現時点の塩化物イオン量の分布と最も合致する深さ5mmの塩化物イオン量と建設当時の塩化物イオン拡散係数を逆算により求めた後、図-1に沿って、今後の塩化物イオン拡散係数および鉄筋位置の塩化物イオン量の予測を行うこととした。なお、ここでの予測は安全側に行っており、実測値を厳密に予測したものではない。

鉄筋位置の塩化物イオン量の予測については、理論上、表面塩化物イオン量を超えることはないため、予測値が表面塩化物イオン量に達した場合、達した以降の年次の値は一定としている。また、鉄筋位置は、今回調査した内陸の山間部に立地する道路橋はスパイクタイヤの使用

表-1 調査結果

	A	B	C	D	E
供用開始年度(西暦)	1976	1967	1959	1967	1957
調査年度(西暦)	2012	2012	2012	2012	2012
累積散布塩化物イオン量(CI-kg/m)	56.4	45.7	38.8	6.6	11.4
剥離度 Dm(mm)	15.1	2.1	0.9	3.1	14.1
相対動弾性係数 RE _d (%)					
深さ1cm	51.4	89.2	85.7	87.6	93.5
深さ2cm	70.8	89.2	90.4	93.5	99.1
深さ3cm	85.4	92.8	96.0	93.5	99.0
深さ4cm	85.4	92.8	94.1	93.5	99.0
深さ5cm	67.9	98.2	100.0	99.0	99.0
塩化物イオン量 CI ⁻ (kg/m ³)					
深さ0~1cm	0.94	-	1.93	-	-
深さ1~2cm	-	0.53	1.75	1.90	2.18
深さ2~3cm	0.80	0.50	0.52	1.80	1.92
深さ3~4cm	0.82	0.27	0.21	0.63	1.09
深さ4~5cm	0.71	0.22	0.14	0.20	0.66

	F	G	H	I
供用開始年度(西暦)	1964	1958	1979	1968
調査年度(西暦)	2012	2014	2014	2014
累積散布塩化物イオン量(CI-kg/m)	26.7	1887.8	68.9	59.7
剥離度 Dm(mm)	2.4	44.6	0.6	2.0
相対動弾性係数 RE _d (%)				
深さ1cm	73.5	54.0	59.0	50.0
深さ2cm	73.5	59.0	79.0	55.0
深さ3cm	81.2	60.0	79.0	83.0
深さ4cm	93.6	59.0	79.0	96.0
深さ5cm	99.0	-	88.0	98.0
塩化物イオン量 CI ⁻ (kg/m ³)				
深さ0~1cm	-	-	-	0.34
深さ1~2cm	0.34	1.14	-	0.22
深さ2~3cm	0.23	1.08	0.99	0.17
深さ3~4cm	0.16	-	0.85	0.16
深さ4~5cm	0.17	1.02	0.62	0.16

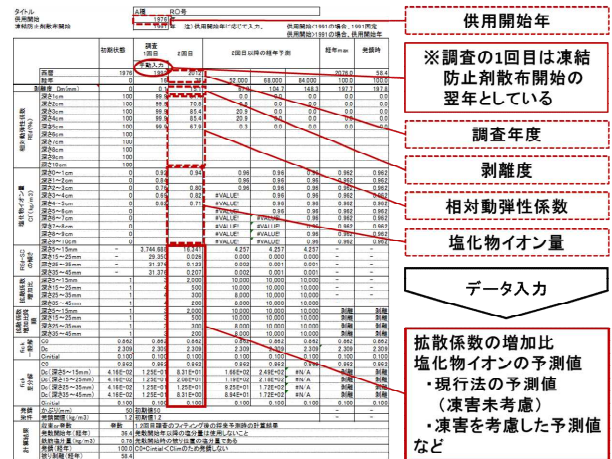


図-7 エクセルプログラムの画面一例

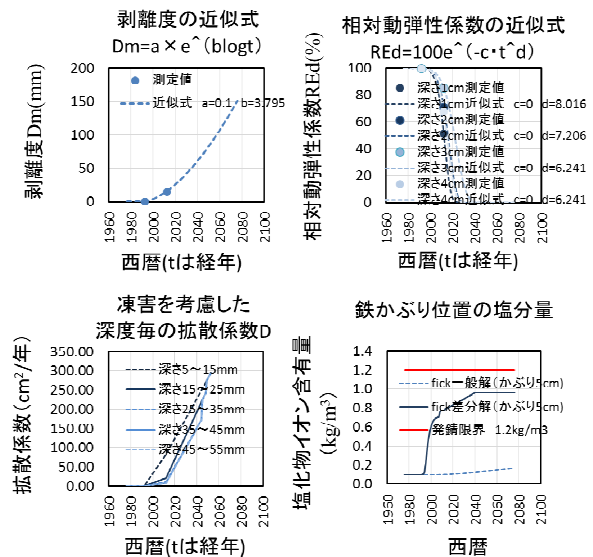


図-8 エクセルプログラムの計算結果一例

が規制される前に建設されていることに鑑み、一律、安全を考慮して「対策区分Ⅲ」に相当する深さ50mm⁹⁾と仮定した。

(3) 予測結果

図-10に塩化物イオン拡散係数の経時変化の予測結果を示す。現在の設計では塩化物イオン拡散係数を常時一定とした予測が行われる⁹⁾が、凍害を考慮した場合、橋梁によって増加比は異なるが、塩化物イオン拡散係数は経時的に増加する解析結果が示された。

図-11に鉄筋位置における塩化物イオン量の予測を示す。建設当初から塩化物イオン拡散係数を常時一定とする現在の設計に基づく予測⁹⁾の場合、9橋全てにおいて発錆限界の1.2kg/m³を下回ったが、凍害を考慮した場合、9橋全てにおいて凍害を考慮しない場合よりも大きな値となり、特にD、Eの2橋は1.2kg/m³を上回り、G橋では1.2kg/m³に近い値に達する結果が示された。この図は、劣化対策を要する部材の選定や、対策・補修の優先順位づけを合理的に行う上で有効と考えられる。

なお、図-5に示すA～F橋の路線は凍結防止剤の散布が少なく、累積散布塩化物イオン量も少ない(表-1)ものの、A橋のように塩化物イオン量は1.2kg/m³には達していないものの相対動弾性係数が減少している(図-12)事例もあった。鉄筋腐食は鉄筋位置の塩化物イオン量だけではなく、凍害も影響を及ぼす(透水・透気性低下、鉄筋露出)ことから、塩化物イオン量の予測だけではなく、凍害の進行速度を考慮した評価も重要と考えられる。

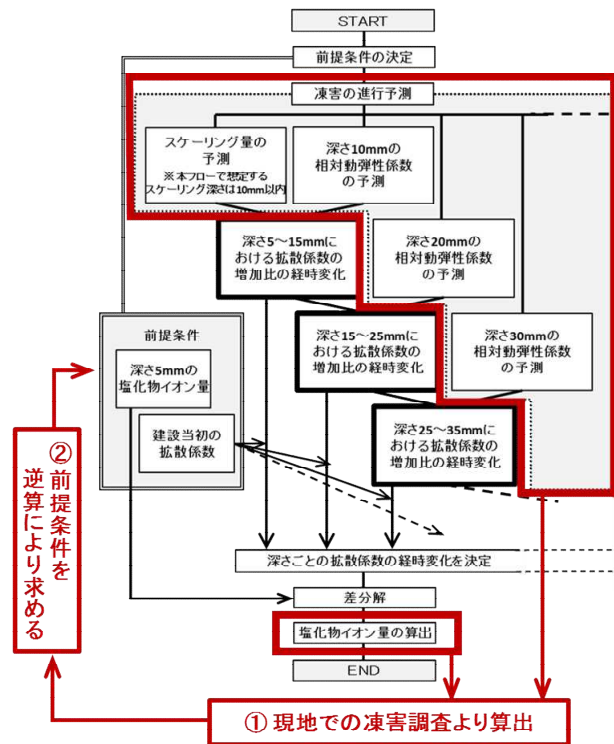


図-9 浸透予測の試みの考え方

4. まとめ

コンクリート構造物の適切な維持管理技術の提案に向けた一環として、過年度にとりまとめた凍害を考慮した塩化物イオンの浸透予測技術を実橋に適用し、鉄筋位置における塩化物イオンの浸透予測を試みた。本研究の範囲で得られた知見を以下に示す。

- (1) 凍害を考慮した場合、橋によって増加比は異なるが、塩化物イオンの拡散係数は経時的に増加する傾向を示した。
- (2) 建設当初から塩化物イオン拡散係数を常時一定とした場合は9橋全てが発錆限界の1.2kg/m³を下回ったが、凍害を考慮した場合は9橋中2橋が1.2kg/m³に達し、1橋が近い値まで増加することを示した。

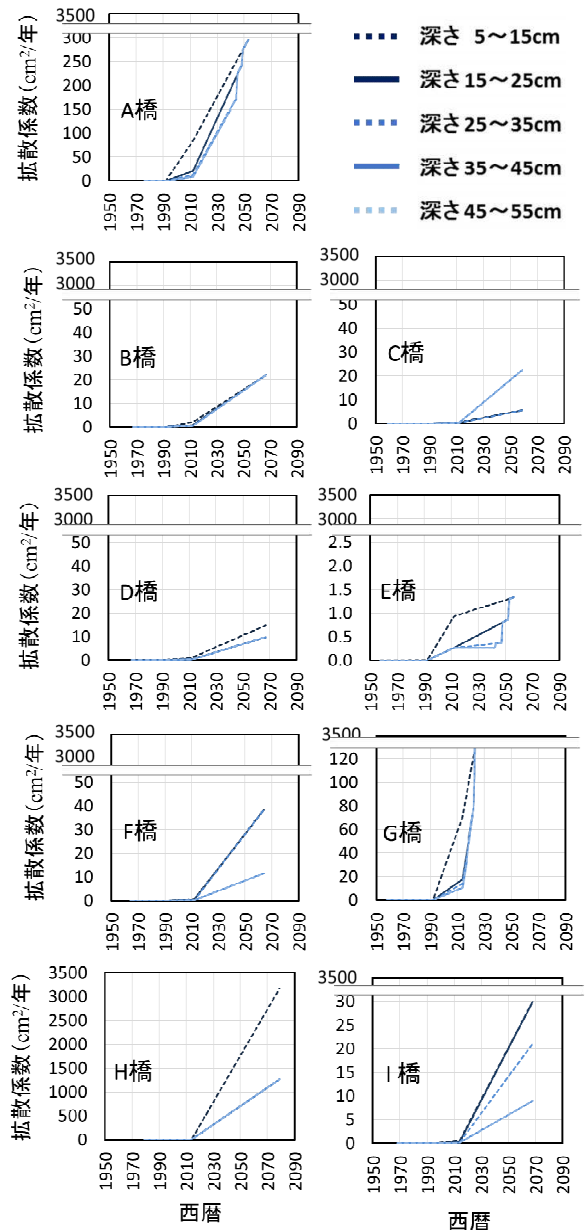


図-10 凍害を考慮した深度毎の拡散係数

- (3) 今回用いた予測技術は、劣化対策を要する部材の選定や、対策・補修の優先順位づけを合理的に行う際に有効と考えられる。
- (4) 鉄筋腐食の予測に際しては塩化物イオン量に加え、凍害の進行も影響することから、この両方について考慮する必要がある。

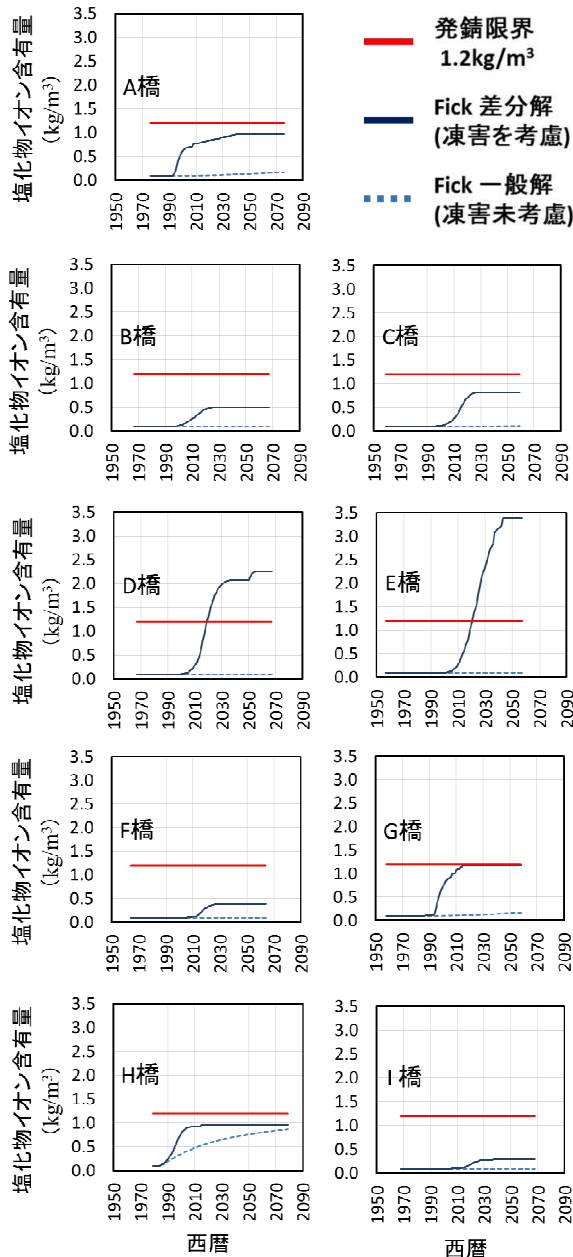


図-11 鉄筋位置の塩化物イオン量

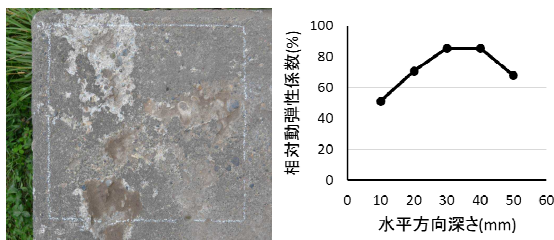


図-12 凍結防止剤の供給が少なくても凍害の影響を受けている A 橋の事例

図-4でも述べたように、凍害の進行予測は、塩化物イオン拡散係数の増加比の経時変化を決定する上で重要な情報である。凍害の進行は、気候・地理条件、凍結防止剤の散布状況等と密接な関係がある。設計段階から予測を行う場合、これらの要因が凍害の進行予測を構成する係数にどのような影響を及ぼすのか、適切に把握しておくことが大切である。今後は、他の現場でも予測を試みるとともに、凍害の進行予測式を構成する係数に及ぼす環境条件（気候、凍結防止剤散布量など）の影響に着目した調査・データ取得を進めていく予定である。

謝辞：調査にご協力頂いた北海道開発局札幌、旭川、帯広、網走開発建設部の関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 遠藤裕丈、島多昭典：凍結融解と塩化物の複合作用を受けるコンクリートの性能評価法の提案、第 59 回(平成 27 年度)北海道開発技術研究発表会発表概要集、2016.2
- 2) 遠藤裕丈、島多昭典、川村浩二：環境条件の変遷を考慮した凍害予測に関する基礎的研究、第 14 回コンクリート構造物の補修、補強、アップグレード論文報告集、pp.141-148、2014.10
- 3) 守分敬郎、長滝重義、大即信明、三浦成夫：既設コンクリート構造物の塩化物イオンの拡散過程より評価される表面処理工法の適用性、土木学会論文集、№520、V-28、pp.111-122、1995.82
- 4) 北海道開発局港湾部港湾建設課、寒地港湾技術研究センター：海洋環境下におけるコンクリートの耐久性向上技術検討業務報告書、資 1-10、2000.3
- 5) 高田尚人、遠藤裕丈、島多昭典：寒冷地山間部の道路橋橋台コンクリートにおける塩化物イオンの浸透性の評価、第 59 回(平成 27 年度)北海道開発技術研究発表会発表概要集、2016.2
- 6) 長谷川寿夫：コンクリートの凍害危険度算出と水セメント比限界値の提案、セメント技術年報、Vol.29、pp.248-253、1975
- 7) 緒方英彦、野中資博、藤原貴央、高田龍一、服部九二雄：超音波法によるコンクリート製水路の凍害診断、コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム論文集、pp.63-70、2006.12
- 8) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説、IV下部構造編、p169、p177、2000.3
- 9) 公益社団法人土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書「維持管理編」、p171、2008.10.