

# 凍害の影響を考慮したコンクリートの塩化物イオン浸透予測技術に関する研究

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○遠藤 裕丈  
田口 史雄  
田畑浩太郎

コンクリート構造物の長寿命化を効率的に図るには、合理的な耐久性の設計ならびに適切な維持管理計画の立案を行うことが大切である。そのためには、コンクリートの劣化予測技術の精度向上が必要である。本研究では、凍害による各種劣化形態が複合（例えば、スケーリングとひび割れ）した場合の塩化物イオンの浸透予測技術の提案を行うため、Fick（フィック）の拡散方程式の差分法を用いた塩化物イオンの浸透予測の適用性を実験により検証した。その結果、差分法を活用し、凍害の進展に応じて塩化物イオン拡散係数を経時的に変化させる手法により、塩化物イオンの浸透予測の精度を高めることができる知見を得た。

キーワード：コンクリート、凍害、塩害、劣化予測、差分法

## 1. はじめに

厳しい財政情勢を受け、今後は更にライフサイクルコストが最小となるような予防保全型の維持管理を計画的に進めることや、コンクリート構造物の長寿命化を適切に図ることが強く求められる。そのためには、耐久性に関する設計を合理的に行う劣化予測技術の向上が不可欠である。

例えば、現在の塩害の劣化予測は、塩化物イオンの浸透挙動がコンクリート表面の塩化物イオン量とコンクリート内部の塩化物イオンの見かけの拡散係数（以下、塩化物イオン拡散係数と記す）が常時一定の Fick の拡散方程式の解に従うと仮定し、簡便な式(1)を用いた予測が一般的に行われている<sup>1), 2)</sup>。

$$C(x,t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (1)$$

ここに、 $C(x,t)$  は時間  $t$  (年) における深さ  $x$  (cm) の塩化物イオン量 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $D$  は塩化物イオン拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )、 $C_0$  はコンクリート表面の塩化物イオン量 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $\operatorname{erf}$  は誤差関数である。

しかし、寒冷地のコンクリート構造物は凍害（写真-1）を受けやすい環境下に曝されており、凍結融解によるスケーリングとひび割れの発生と塩化物イオンの供給が同時に起こりやすい。そのため、寒冷地においては、図-1に示すように凍害が塩化物イオンの拡散に及ぼす影



写真-1 凍害の事例 (北海道山間部の道路橋下部)

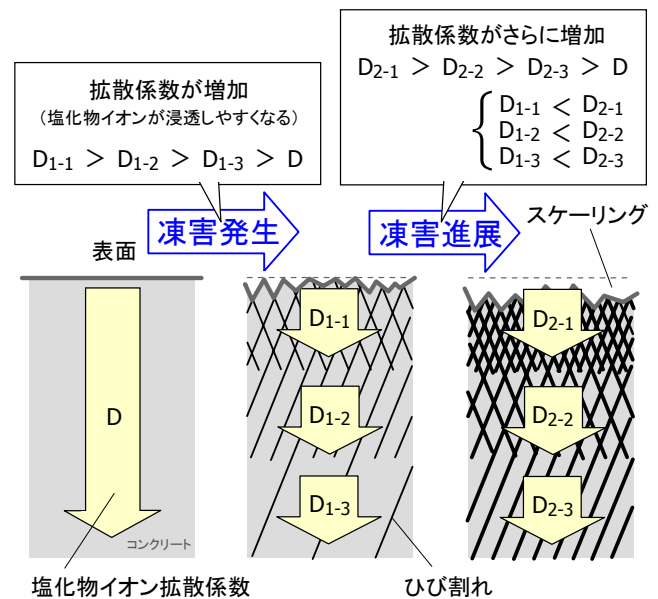


図-1 塩化物イオンの拡散に及ぼす凍害の影響のイメージ

響を適切に考慮した合理的な塩化物イオン浸透予測技術が必要である。そこで本研究では、凍害による各種劣化形態（ここでは、スケーリングとひび割れの2種類を対象）が複合的に発生しているコンクリートの耐久性を合理的に評価する技術の提案に向け、その一つとして、凍害の影響を考慮した塩化物イオンの浸透予測についての基礎的な検討を行った。

## 2. 実験概要

### (1) コンクリート配合・使用材料

表-1にコンクリート配合を示す。セメントは高炉セメントB種を用いた。水セメント比は45、55、65%の3水準とし、目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ に設定した。細骨材は苫小牧錦岡産の海砂（表乾密度 $2.67\text{g/cm}^3$ 、絶乾密度 $2.65\text{g/cm}^3$ 、吸水率 $0.87\%$ 、粗粒率 $2.85$ ）、粗骨材は小樽見晴産の碎石（表乾密度 $2.67\text{g/cm}^3$ 、絶乾密度 $2.62\text{g/cm}^3$ 、吸水率 $1.78\%$ 、粗粒率 $6.74$ ）を使用した。粗骨材の最大寸法は $25\text{mm}$ とした。AE減水剤は、リグニンスルホン酸化合物およびポリオール複合体を主成分とするものを使用した。

### (2) 供試体・養生

図-2に供試体を示す。供試体の寸法は $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ とした。打設後、材齢7日まで湿った麻布で供試体を覆い、その後は試験開始材齢の28日まで供試体を恒温恒湿室（温度 $20^\circ\text{C}$ 、湿度 $60\%$ ）に静置した（28日の圧縮強度は表-1に併記）。ここでは構造物の状態にあわせて、コンクリートの一面にのみから試験水を供給する環境作用を与えることとした。対象面は劣化を促進させる理由から比較的脆弱となりやすい打設面（ $10 \times 40\text{cm}$ ）とし、打設面以外の5面にはスチレンボードを貼り付けて防水処理を施した。

### (3) 実験方法

材齢28日から凍結融解試験、ならびに、比較のための凍結融解を与えない塩水浸漬試験を開始した。実験の流れを図-2、実験の様子を写真-2に示す。試験水は、濃度 $3\%$ の塩化ナトリウム水溶液（以下、塩水と記す）を用いた。凍結融解試験はJIS A 1148を準用し、コンクリート面を $3\text{mm}$ 厚の塩水で覆うことができるゴム製の容器に供試体を挿入し、塩水を容器に注いだ後、容器を試験槽に格納して $-18^\circ\text{C} \sim 5^\circ\text{C}$ の範囲で1サイクル3~4時間の凍結融解作用を与えた。一般的な凍結融解試験のサイクルは300サイクルであるが、ここでは長期的な劣化挙動を把握するため、試験は600サイクルまで行った。

途中、約36サイクルに1回の割合で容器内から剥離片を採取して $110^\circ\text{C}$ で乾燥させた後、剥離片の質量を測定してスケーリング量を求めた。また、あわせて、スケー

表-1 コンクリート配合および圧縮強度（実測値）

W/C (%)	単位量( $\text{kg/m}^3$ )				目標空気量	圧縮強度 (MPa)
	W	C	S	G		
45	145	322	808	1073	$4.5 \pm 1.5\%$	41.1
55	147	267	865	1059		19.2
65	149	229	917	1035		16.4

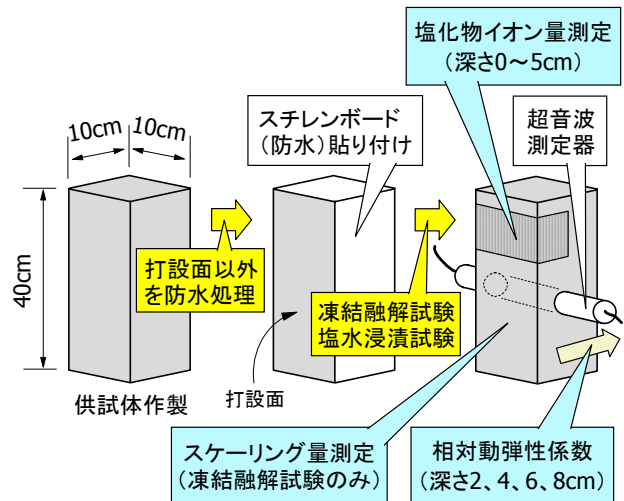


図-2 供試体および実験の流れ

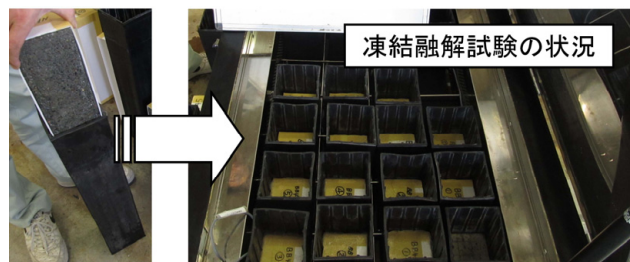


写真-2 凍結融解試験および塩水浸漬試験の状況

リング量をコンクリートの密度（表-1より算出）で除して平均剥離深さを調べた。

相対動弾性係数および塩化物イオン量の測定は100、200、300、400、500、600サイクルに行った。相対動弾性係数は、超音波測定器を用いて深さ2、4、6、8cm位置の超音波伝播速度を測定し、それぞれの深さ位置の相対動弾性係数を式(2)、式(3)より求めた<sup>3)</sup>。

$$E_{dn} = 4.0387V_n^2 - 14.438V_n + 20.708 \quad (2)$$

$$RE_d = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \times 100 \quad (3)$$

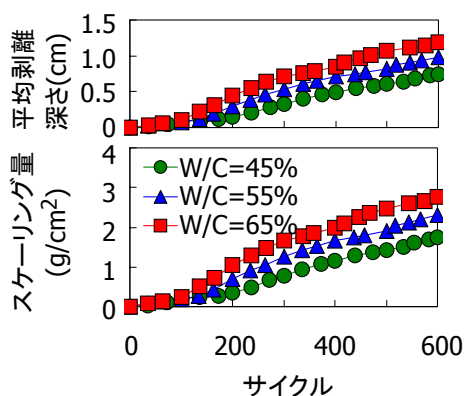


図3 スケーリング量の測定結果

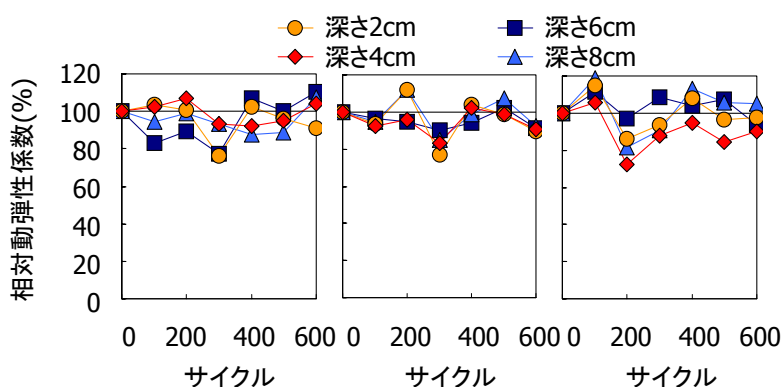


図4 それぞれの深さ位置の相対動弾性係数の測定結果

ここに、 $E_{dn}$ は凍結融解作用を $n$ サイクル与えた時の動弾性係数(GPa)、 $V_n$ は $n$ サイクルにおける超音波伝播速度(km/s)、 $RE_d$ は $n$ サイクルにおける相対動弾性係数(%)である。 $E_{d0}$ は凍結融解の影響を受けていないコンクリートの動弾性係数(GPa)で、一般には凍結融解試験前(0サイクル)の測定値があてられるが、ここでは実験結果に及ぼす水和の影響を極力排除する理由から、凍結融解試験と同じ期間だけ塩水に浸漬させた供試体の動弾性係数をあてることとした。

塩化物イオン量の測定は JIS A 1154 の硝酸銀滴定法に準じて行った。コンクリートカッターを使用し深さ 0~5cm の範囲を 1cm 間隔でスライスし、深さ 0~1cm、1~2cm、2~3cm、3~4cm、4~5cm 間における全塩化物イオン量を測定した。比較対象である塩水浸漬試験の測定は凍結融解試験の期間にあわせて浸漬 17、34、50、67、84、100 日経過時(それぞれ凍結融解 100、200、300、400、500、600 サイクルまでの日数に相当)に行った。

### 3. 実験結果・考察

#### (1) 凍結融解作用を与えた供試体の損傷状況

図3にスケーリング量の測定結果を示す。スケーリング量は水セメント比が大きいほど多く、水セメント比と密接な関係にある結果が明確に示された。平均剥離深さも凍結融解サイクルの進捗に伴って増加し、300 サイクルでは 0.3~0.7cm、600 サイクルでは 0.7~1.1cm であった。

図4に相対動弾性係数の測定結果を示す。相対動弾性係数は全体的に 80%以上で、耐凍害性能を概ね満足する値<sup>9)</sup>を示した。スケーリング量の測定結果とは対照的に、相対動弾性係数に及ぼす水セメント比の影響はさほど見られなかった。また、深さの違いによる差も殆ど示されなかった。

今回の実験においては、凍害による損傷は内部よりも表面近傍において集中的に発生する形態を呈した。

ここでは、寒冷地での一般的なコンクリートの配合設計にあわせて AE 減水剤を使用しているが、AE 減水剤の使用によって混入されるエントレインドエアは、凍結行程で発生する未凍結水の移動による水圧を緩和させる機能を有することが知られている<sup>9)</sup>。相対動弾性係数については、水セメント比の影響よりも AE 減水剤の効果が卓越したことが考えられる。

#### (2) 塩化物イオンの浸透状況

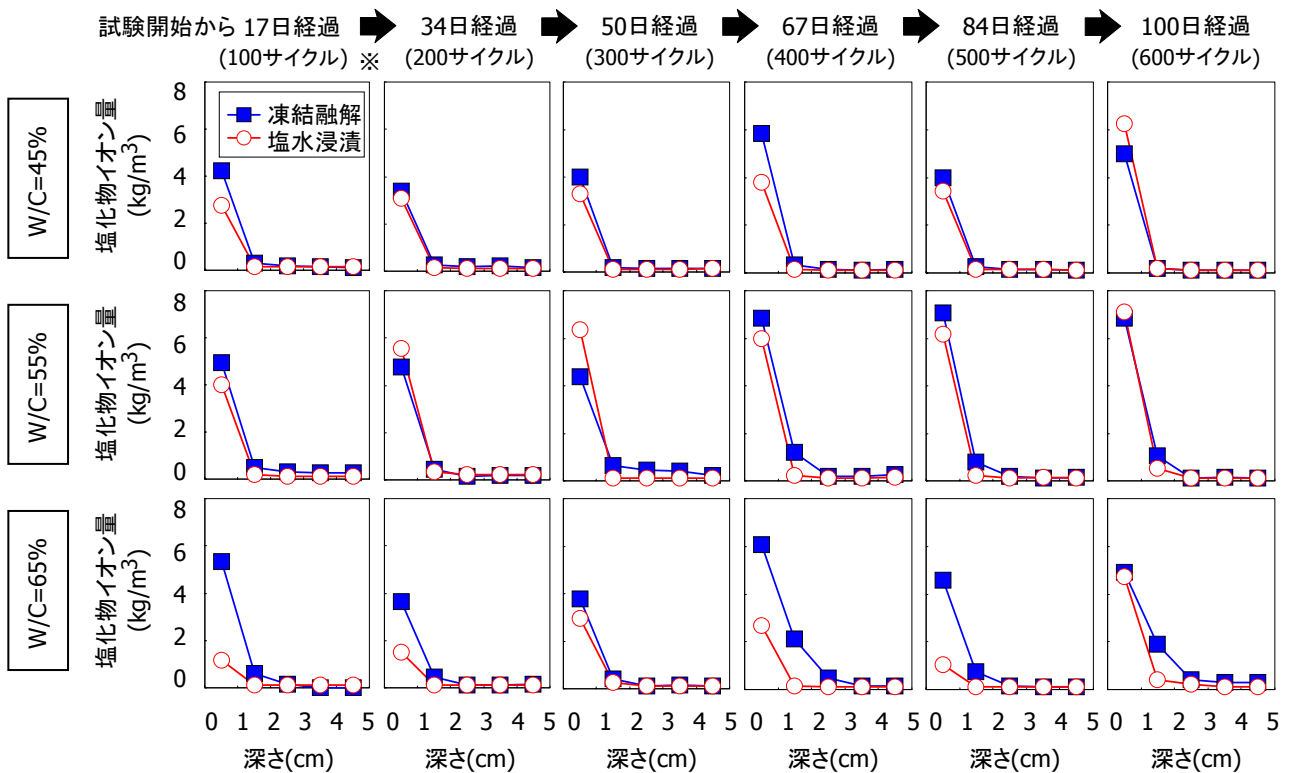
図5に塩化物イオン量の測定結果を示す。水セメント比 45%は、深さ 0~1cm には塩化物イオンが多く浸透していたものの、深さ 1cm 以降については塩化物イオン量が 0.1kg/m<sup>3</sup>程度以下と少なかった。また、凍結融解作用を与えた場合と塩水浸漬のみ行った場合の塩化物イオンの濃度分布の差異は小さかった。水セメント比 55%は 50 日以降、深さ 1~2cm の塩化物イオン量は凍結融解作用を与えた方がやや多い傾向が見受けられた。水セメント比 65%は、深さ 1~2cm の塩化物イオン量は凍結融解作用を与えた方が多い傾向が試験開始直後から見られ、その差は 67 日以降、より顕著に表れた。また、ばらつきはあるが、67 日以降は深さ 2~3cm でも凍結融解作用を与えた方が塩化物イオン量は大きい傾向が示された。図4で示したように相対動弾性係数は全体的に 80%以上ではあったものの、塩化物イオンの浸透に及ぼす凍害の影響が表れていることが確認された。

図5をみると、深さ 0~1cm では塩化物イオン量に及ぼす水セメント比の影響が明確には表れておらず、中には水セメント比 45、55%に比べると 65%の方が小さい値を示しているものもある。しかし、深さ 1~2cm では図6に示すように、水セメント比 45 よりも 55%、65%の方が大きい値となっており、水セメント比が大きいコンクリートにおいては、多くの塩化物イオンがコンクリートの表層を通過し、内部へ浸透しやすい傾向にあることが確認された。

#### (3) 塩化物イオン拡散係数を常時一定とした場合の予測

図7は式(1)で示した、塩化物イオン拡散係数を常時





※カッコの数値は、凍結融解試験の供試体に与えた凍結融解サイクル数

図-5 塩化物イオン量の測定結果

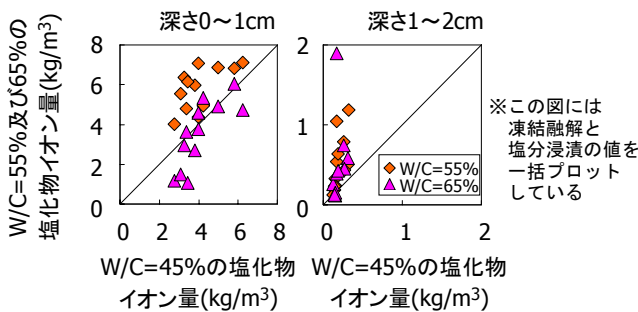


図-6 深さ0~1cm、1~2cmにおける水セメント比45%と55・65%の塩化物イオン量の関係 (同じ日数同士を比較)

深さと時間の2つを変数にとって塩化物イオン拡散係数を経時的に変化させる場合、Fickの拡散方程式そのものを解くことになるため、計算が複雑になる。このため、簡易な方法として、式(4)に示すFickの拡散方程式の差分分解<sup>6)</sup>を適用した予測について検討を加えた。

$$\begin{cases} C_{m,n+1} = Dr(C_{m+1,n} + C_{m-1,n}) + C_{m,n}(1 - 2Dr) \\ r = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (\text{ただし } r \leq \frac{1}{2}) \end{cases} \quad (4)$$

一定とした式から求めた計算値と、塩水浸漬試験の実測値を比較したものである。データは概ね45°線に沿ってプロットされた。式(1)は凍結融解作用を受けない塩水浸漬環境下での予測には適すると言える。

一方、図-8は式(1)から求めた計算値と、凍結融解作用を与えた場合の実測値を比較したものである。図-7に比べるとばらつきがやや大きく、深さ1cm以降においてはデータの多くが45°線よりも上の範囲にプロットされた。このことから、凍結融解環境下において式(1)を適用すると、予測値と実測値との乖離が懸念される。

#### (4) 塩化物イオン拡散係数を変化させた場合の予測 (凍結融解作用を与えた供試体について)

次に、凍害の進展に応じて、それぞれの深さの塩化物イオン拡散係数を経時的に変化させた予測を試みる。

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/m<sup>3</sup>)、 $r$ は係数、 $\Delta t$ は時間 $t$ のきざみ幅( $n\Delta t$ )、 $\Delta x$ は深さ $x$ のきざみ幅( $m\Delta x$ )である(図-9)。

なお、式(4)は表面被覆材の施工や断面補修の実施に伴い、塩化物イオン拡散係数が部材の供用途中で部分的に変化する場合の予測において活用されている<sup>6)7)</sup>。ここでは、式(4)の理論を凍結融解環境下での塩化物イオンの浸透予測に応用し、以下の手順で予測を試みた。

##### a) $\Delta x$ の設定

$\Delta x$ は0.5cmとした。

##### b) $\Delta t$ の設定

$\Delta t$ は0.05年(≒17日=100サイクル)とした。

##### c) 表面塩化物イオン量( $C_{0,n}$ )の設定

計算に先立ち、まず境界条件となる式(1)の $C_0$ に相当

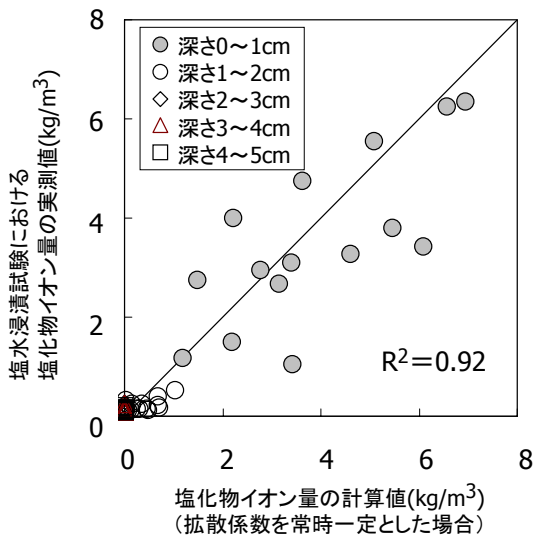


図-7 塩化物イオン量の計算値と実測値（塩水浸漬試験）

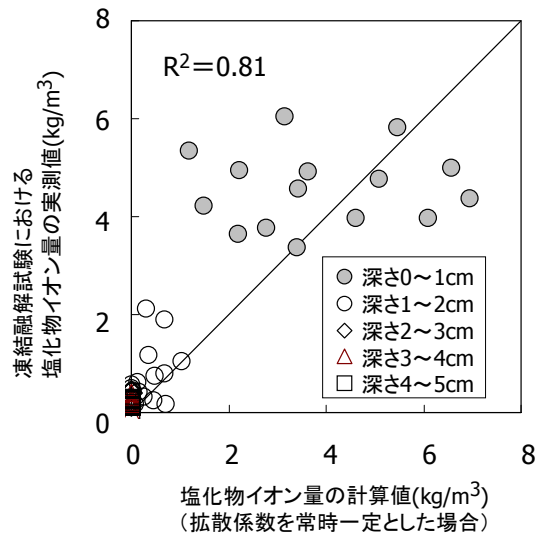


図-8 塩化物イオン量の計算値と実測値（凍結融解試験）

する表面位置における塩化物イオン量（式(4)においては  $C_{0,n}$  と表される）を決定する必要がある。しかし、塩分供給環境下で凍結融解作用を与えるとスケーリングが進行するため表面位置が変化し、 $C_{0,n}$  を決定することは難しい。そのため、更に簡単に計算しやすくするため、今回の検討では表面に最も近い深さ 0～1cm の塩化物イオン量を代用することとした。なお、深さ 0～1cm の塩化物イオン量の経時変化は先の実測値を回帰分析し（図-10）、その回帰式から  $C_{0,5,n}$  を決定した。

#### d) 塩化物イオン拡散係数 ( $D$ ) の設定

深さ 1～2cm、2～3cm、3～4cm、4～5cm の塩化物イオンの実測値を式(4)に代入し、 $D$  を変化させて、各深さの塩化物イオン量の計算値 ( $C_{1,5,n}$ 、 $C_{2,5,n}$ 、 $C_{3,5,n}$ 、 $C_{4,5,n}$ ) との残差平方和が最小となる深さ 0.5～1.5cm 間、1.5～2.5cm 間、2.5～3.5cm 間、3.5～4.5cm 間の塩化物イオン拡散係数をそれぞれ求めた。ここでは計算を簡単に行うため、塩化物イオン拡散係数の経時変化は一次関数と仮定して計算を行った。

図-11 に深さ 0.5～1.5cm 間、1.5～2.5cm 間、2.5～3.5cm 間、3.5～4.5cm 間の塩化物イオン拡散係数の経時変化の計算結果を示す。0 サイクルの塩化物イオン拡散係数（グラフの切片）は凍害を受ける前すなわち塩水浸漬における塩化物イオン拡散係数としている。今回の検討においては、水セメント比 45% は図-5 でも示したように凍結融解と塩水浸漬の塩化物イオン量の分布の差異が小さかったこともあり、塩化物イオン拡散係数の増加は示されなかった。水セメント比 55% は深さ 0.5～1.5cm 間、水セメント比 65% は 0.5～2.5cm 間において塩化物イオン拡散係数の増加が示された。600 サイクルにおける水セメント比 55、65% の深さ 0.5～1.5cm 間の塩化物イオン拡散係数は、凍結融解を受ける前に比べると約 2 倍増加していた。

これらの結果をもとに求めた計算値と、凍結融解作

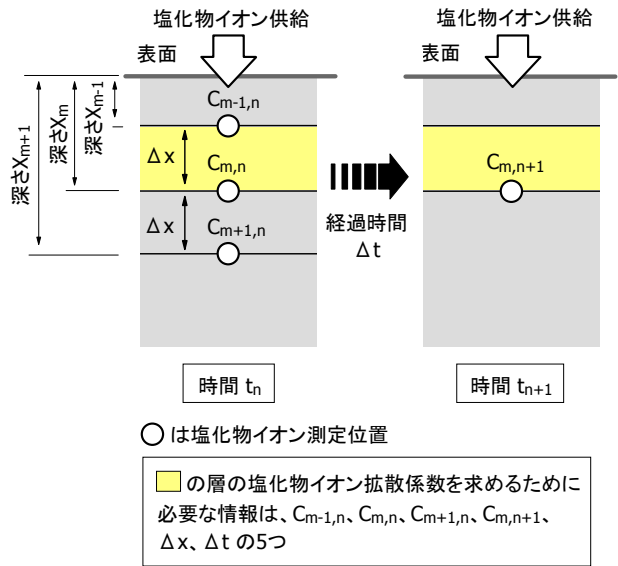


図-9 差分法により塩化物イオン拡散係数を求めるために必要な情報

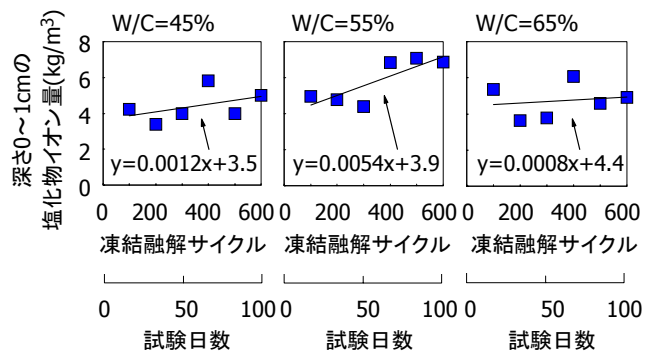


図-10 深さ0～1cmの塩化物イオンの経時変化（図中に併記している回帰式の  $y$  は塩化物イオン拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )、 $x$  は凍結融解サイクルを表している）

用を与えた時の実測値との比較を図-12 に示す。図-8 に比べるとばらつきは改善され、式(4)より求めた深さ 1cm 以降の計算値も 45°線の近傍に概ねプロットされた。

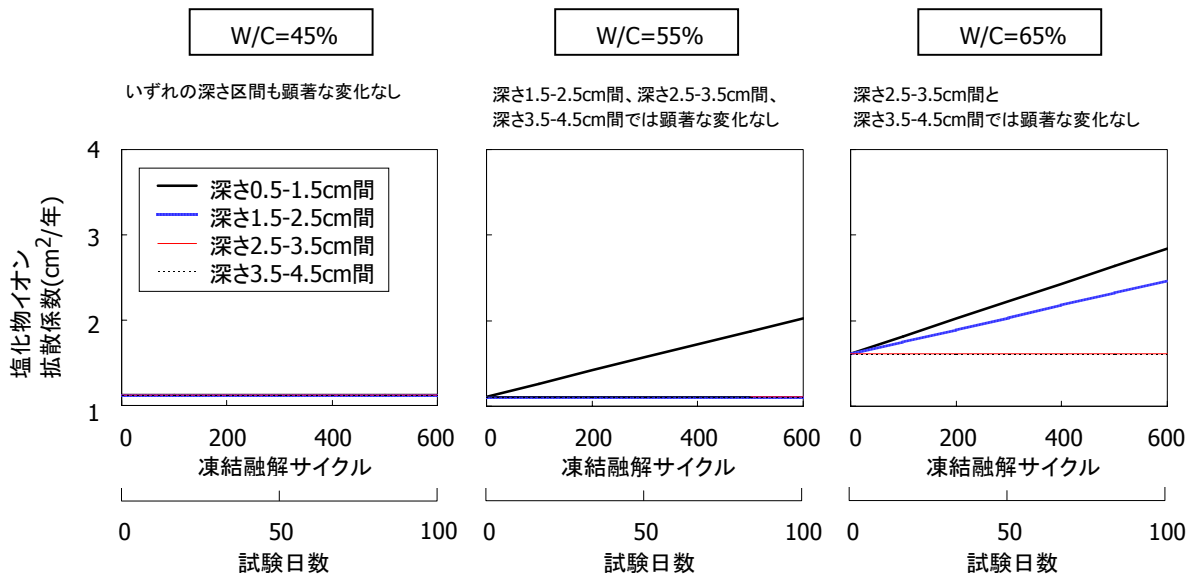


図-11 差分分解による塩化物イオン拡散係数に及ぼす凍結融解作用の影響の評価

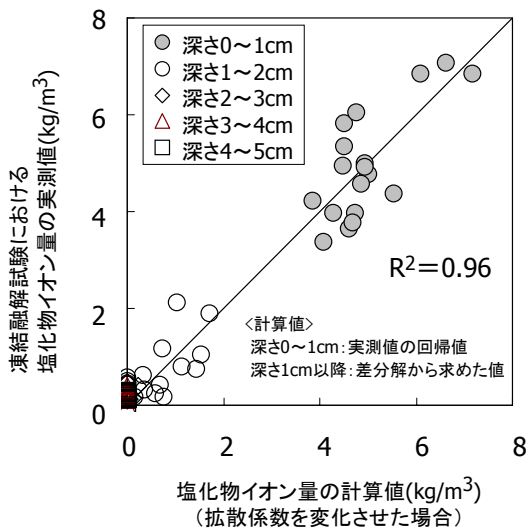


図-12 塩化物イオン量の計算値と実測値 (凍結融解試験)

データが未だ少なく、現場での適用に向けてさらに検討を重ねる必要はあるものの、凍結融解環境下においては差分分解を活用し、凍害の進展に応じて塩化物イオン拡散係数を経時的に変化させることで塩化物イオン浸透予測の精度を高めることができる知見を得た。

#### 4. まとめ

本研究では、凍害による各種劣化形態が複合的に発生しているコンクリート（ここでは、スケーリングとひび割れの2種類を対象）の耐久性を合理的に評価する技術の提案に向け、その一環として、凍害の影響を考慮した塩化物イオンの浸透予測についての基礎的な検

討を行った。今回行った実験および検討の範囲で得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- (1) 1サイクル3~4時間の凍結融解を600サイクル与えたところ、表面から深さ1.5~2.5cmまでの範囲において塩化物イオン拡散係数の増加が示された。
- (2) 凍結融解環境下での塩化物イオン浸透予測の方法として、Fickの拡散方程式の差分分解が活用できることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書「設計編」, p.119, 2008.3
- 2) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書「維持管理編」, p.112, 2008.6
- 3) 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
- 4) 文献 1), p.123
- 5) 長谷川寿夫, 藤原忠司：コンクリート構造物の耐久性シリーズ「凍害」, 技報堂出版, 1988.2
- 6) 守分敦郎, 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, No.520, V-28, pp.111-122, 1995.8
- 7) 朝倉啓仁, 林田宏, 田口史雄, 嶋田久俊：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, 土木学会北海道支部論文報告集第63号, F-3, 2007.