# 論文 凍害を考慮した塩害に対するコンクリートの耐久性設計・評価法の体 系化に関する基礎的研究

## 遠藤 裕丈\*1·島多 昭典\*2

要旨:凍害を考慮した塩害に対するコンクリートの耐久性設計・評価法の体系化に向け,その一環として, ASTM C 672 に準じた条件下で塩水による凍結融解試験ならびに塩化物イオン量の測定を行い,塩化物イオン の見かけの拡散係数に及ぼす凍害(スケーリング,相対動弾性係数)の影響を定量的に調べた。そして,取 得したデータの範囲で,凍害の発生状況をもとに表面から深さ 5~15mm 間および深さ 15~25mm 間における 塩化物イオンの見かけの拡散係数の経時変化を安全側に設計する考え方を示した。

キーワード:スケーリング,相対動弾性係数,塩化物イオン拡散係数,劣化予測

#### 1. はじめに

コンクリート構造物を長期にわたり合理的に維持管 理するには、供用期間中に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定量的に確認し、適 切な時期に計画的な対応をとることが大切である。その ためには実態に即した耐久性設計・評価法が必要となる。

例えば、寒冷地においては、道路橋を構成するコンク リート部材は凍結融解と凍結防止剤との複合作用を受け やすく、凍・塩害による複合劣化が懸念される。著者ら は広く普及している JIS A 1148 を準用した塩水による急 速凍結融解試験を行い、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)は凍害の進行 に応じて経時的に増加することを示した<sup>1)</sup>。しかし JIS A 1148 は、異なる使用材料や配合のコンクリートの凍結融 解抵抗性を相互に比較するための試験であって、実際の 条件を再現したものではなく、中にはコンクリートの含 水状態や温度勾配などの諸条件が実環境に対して厳しい という意見もある<sup>2)</sup>。実態に即した凍・塩害に対するコ ンクリートの耐久性設計・評価法を開発するには、実環 境により近い条件下でのデータの取得・蓄積も望まれる。

そこで,JIS A 1148 に比べて凍結融解の繰り返しが緩 やかな ASTM C 672 に準じた塩水による一面凍結融解試 験を行い,塩化物イオン拡散係数に及ぼす凍害の影響を 調べた。さらに,凍害を考慮した塩害に対するコンクリ ートの耐久性設計・評価法の体系化について考察した。

#### 2. 研究の進め方

凍害(スケーリング,相対動弾性係数)の進行を予測 する簡易なモデルとして,既報は次式を示している<sup>3),4)</sup>。

$$SC = ae^{b\log\frac{cyc}{A}}$$
 (1)

$$RE_d = 100e^{-c \cdot cyc^d} \tag{2}$$

ここに、SC はスケーリング量(g/cm<sup>2</sup>)、RE<sub>d</sub> は相対動弾 性係数(%)、cyc は凍結融解サイクル(以下、サイクルと 記す)、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の値)、a、b、c、d は係数である。 一方、塩害の進行予測については、現在の設計ではコ ンクリート表面の塩化物イオン量と内部における塩化物 イオン拡散係数を常に一定として解いた Fick の拡散方 程式の解である式(3)<sup>5)、6)</sup>が使用されている。

$$C(x,t) = C_0 \left( 1 - erf\left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}}\right) \right)$$
(3)

ここに, C(x,t)は時間 t (年)における表面から深さ x (cm) の塩化物イオン量(kg/m<sup>3</sup>),  $C_0$ はコンクリート表面の塩化 物イオン量(kg/m<sup>3</sup>), erf は誤差関数, D は健全なコンクリ ートにおける塩化物イオン拡散係数(cm<sup>2</sup>/年)である。

しかし, それぞれの深さに位置するコンクリート組織 が凍害を受ける場合, 凍害の進行にあわせて塩化物イオ ン拡散係数を経時的に変化させる必要がある。深さと時 間を変数として塩化物イオン拡散係数を変化させる場合, Fick の拡散方程式そのものを解くことになるため計算は 複雑になる。著者らは式(4)に示す Fick の拡散方程式の差 分解<sup>7)</sup>を活用した予測を試み, 凍結融解環境下での塩化 物イオン浸透予測を比較的簡易に行えることを示した<sup>1)</sup>。

$$\begin{cases} C_{m,n+1} = D_{m,n} r \left( C_{m+1,n} + C_{m-1,n} \right) + C_{m,n} \left( 1 - 2D_{m,n} r \right) \\ r = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \qquad ( \text{for for } l \quad r \leq \frac{1}{2} ) \end{cases}$$
(4)

\*1 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 研究員 博士(工学) (正会員) \*2 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 上席研究員 (正会員)



図-1 凍害の発生状況から塩化物イオン拡散係数の 経時変化を決定する流れの基本概念

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 ( $t_n = n\Delta t$ )、  $\Delta x$ は深さxのきざみ幅 ( $x_m = m\Delta x$ )、 $D_{m,n}$ は時間 $t_n$ における 深さ $x_{m-1} \sim x_m$ 間の塩化物イオン拡散係数(cm<sup>2</sup>/年)である。 著者らは既報<sup>1)</sup>で、変化の割合をgとした式(5)で $D_{m,n}$ の大 凡の経時変化を表せると仮定して解析した結果を示した。

$$D_{m,n} = g \cdot cyc + D \tag{5}$$

式(1), (2), (5)より, 図-1 のように, 凍害の発生状況 から塩化物イオン拡散係数の増加比の設定が可能となる。

すなわち, 凍害を考慮した塩害に対する耐久性設計・評価法は, 図-2のように体系化できると考えられる。

まず,表面に近い深さ 5~15mm 間の塩化物イオン拡散 係数の経時変化は,上層の劣化情報であるスケーリング量 と,評価対象層の劣化情報である深さ 10mm の相対動弾 性係数に依存すると仮定する。式(1)を cyc について解くと 式(6)が得られ,式(6)を式(2)に代入すると図に示すスケー リングとひび割れ (相対動弾性係数で評価)が同時に発生・ 進行しているコンクリートの状態を表す曲線が得られる。

$$cyc = A \cdot 10^{\frac{\ln \frac{SC}{a}}{b}}$$
(6)

塩化物イオン拡散係数の増加比が2倍,3倍,…に達す るサイクルを式(5)から求め,その結果をスケーリング量 と相対動弾性係数の関係を表す曲線上に明示することで, 凍害の発生状況から塩化物イオン拡散係数の増加比が設 定できるようになる。

次に、その下層の深さ 15~25mm 間の塩化物イオン拡 散係数の経時変化は、上層の劣化情報である、スケーリン グ量と深さ 10mm の相対動弾性係数の影響の双方が包括 された深さ 5~15mm 間の塩化物イオン拡散係数の増加比



図-2 本研究でめざす体系化のイメージ

## 表-1 コンクリートの配合

記号	セメ	W/C	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
	ント	(%)	W	С	S	G
N45	普通 ポルト	45	144	320	815	1082
N55		55	146	265	871	1065
N65		65	148	228	922	1041
B45	高炉 B種	45	145	322	808	1073
B55		55	147	267	865	1059
B65		65	149	229	917	1035
【備考】	・ W/C は水セメント比, W は水, C はセメント, S は					
	細骨材, G は粗骨材(最大径は 25mm)を表す					
	<ul> <li>目標空気量は4.5±1.5%</li> </ul>					

と,評価対象層の劣化情報である深さ 20mm の相対動弾 性係数に依存すると仮定する。同様に整理することで凍害 の発生状況から塩化物イオン拡散係数の増加比が設定で きる。さらにその下層についても同じ要領で設定ができる。

そして,式(4)による計算を繰り返し行うことによって, 凍害を考慮した塩害の進行予測ができる。

本論文では図-2に示す設計・評価法の体系化をめざし、 その一環として、凍害の発生状況と塩化物イオン拡散係数 の増加比との関係について調べた。

### 3. 実験概要

#### 3.1 コンクリートの配合・材料

**表-1** にコンクリートの配合を示す。セメントは普通 ポルトランドセメント(以下,普通ポルトと記す)およ



び高炉セメントB種(以下,高炉B種と記す)の2種類 を使用した。水セメント比は45,55,65%の3水準とし た。細骨材は苫小牧錦岡産の海砂(表乾密度 2.67g/cm<sup>3</sup>, 絶乾密度 2.65g/cm<sup>3</sup>,吸水率 0.87%,粗粒率 2.85),粗骨 材は小樽見晴産の砕石(表乾密度 2.67g/cm<sup>3</sup>,絶乾密度 2.62g/cm<sup>3</sup>,吸水率 1.78%,粗粒率 6.74)を使用した。粗 骨材の最大寸法は25mmとした。実験に使用するコンク リートは,現行の配合設計にあわせてAEコンクリート とし,目標空気量は4.5±1.5%に設定した。混和剤には AE 減水剤(リグニンスルホン酸化合物およびポリオー ル複合体)およびAE助剤(変性ロジン酸化合物系陰イ オン界面活性剤)を使用した。それぞれの配合にはセメ ントの種類と水セメント比を組み合わせた記号を付けた。 3.2 供試体

図-3に供試体を示す。寸法は100×100×400mmの角柱 とし,材齢7日まで湿った麻布で表面を覆った後,試験材 齢の28日まで恒温恒湿室(温度20℃,湿度60%)に静置 した。一面凍結融解試験において塩水を試験面に張るた めの枠は発泡スチロールで作製し,材齢21日にシリコー ンとエポキシ樹脂を用いて据付けた。試験面は凍害を促 進させる理由から比較的脆弱となりやすい打設面とした。

## 3.3 実験方法·測定

一面凍結融解試験は ASTM C 672 を準用した。塩水を 深さ 6mm 張り, -18℃16 時間, 23℃8 時間の1日1サイ クルの空調運転が繰り返される室内で凍結融解を与えた。 塩水は濃度 3%の塩化ナトリウム水溶液とした。供試体 の深さ 10mm の凍結行程時の温度降下速度は-4.7℃/h,融 解行程時の温度上昇速度は+4.4℃/h である。50, 100, 200, 300, 400, 500, 600 サイクル後に供試体を回収し, スケ ーリング量,相対動弾性係数,塩化物イオン量を調べた。

スケーリング量は、試験面から剥離片を採取し、110℃ で24時間乾燥させた後、剥離片の質量を測定して求めた。

相対動弾性係数は,超音波測定器(周波数28kHz)を 使用して求めた。供試体を挟むように超音波の発・受振 子を供試体の両側面にあてて,深さ10mm,20mm,…の 超音波伝播速度を測定し,それぞれの深さの動弾性係数 を式(7)<sup>8)</sup>から求め,相対動弾性係数を式(8)より求めた。

$$E_{dn} = 4.0387 V_n^2 - 14.438 V_n + 20.708 \tag{7}$$

$$RE_d = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \times 100 \tag{8}$$

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,ここでは動弾性係数の 変化に及ぼす水和の影響を極力排除したい理由から,同 じ期間,常温下(20°C)で塩水浸漬のみさせた供試体の 動弾性係数を $E_{d0}$ とすることとした。

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。50, 100, 200, 300, 400, 500, 600サイ クル後に供試体を回収し,凍結融解試験開始前の試験面 から深さ0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50mmに おける全塩化物イオン量を調べた。また,凍害を受けな い場合との比較を行うため,同じ期間,常温下で塩水浸 漬のみさせた供試体による測定もあわせて行った。

#### 4. 実験結果

## 4.1 凍結融解試験の結果

図-4に凍結融解試験の結果を示す。式(1),(2)による 予測もあわせて示す。実測値の推移に増減の揺らぎがあ るが,これは同一供試体による連続測定ではなく,供試 体を21個(7[50,100,…,600サイクル]×3個)準備 し,所定のサイクルに達したらその都度,3個ずつ回収し て測定を行ったためである。ただし,実測値は予測と概 ね対応し,スケーリング量は水セメント比が大きく,ま た既報<sup>3)</sup>と同様に,高炉B種を用いた方が多い傾向を示し た。相対動弾性係数は,ここでは代表して深さ10,20mm の結果を示したが,AEコンクリートを使用した関係もあ って,全体的には80%以上の高い値で推移した。

#### 4.2 塩化物イオン量の測定結果

代表して,凍結融解試験途中の300サイクル目に調べ た塩化物イオン量の結果を図-5に示す。同じ期間,常 温下で塩水浸漬のみさせた結果もあわせて示す。表面に 近い深さ0~10mmは,全体的に塩水浸漬のみの方が多い。 一方,内部は,例えばN65やB65のように,凍結融解を与 えた方が多いものも見受けられる。スケーリングによる 表層欠損等の凍害の影響により,外部から供給された塩 水の多くが表層を透過し,内部へ浸透していることがわ かる。

ここで、塩水浸漬のみのデータから得られる健全なコ ンクリートの塩化物イオン拡散係数を使用し、塩化物イ







(凍害の影響は非考慮) 図-6 塩化物イオン量の予測値と実測値の比較

(予測値は凍害の影響を考慮していない値)

オン拡散係数は常時一定と仮定して式(3)による予測を 行い,凍結融解を与えた場合の実測値との比較を行った。 図-6に結果を示す。図には鋼材腐食発生限界量も併記 した。鋼材腐食発生限界量については、コンクリート標 準示方書<sup>5)</sup>にセメントの種類と水セメント比から計算す る式が示されているが,適用範囲がW/C=30~55%でN65, B65に適用できないこと、凍結融解を受ける場合は計算 値より小さくする旨が示方書<sup>5)</sup>に記載されていることに

15 塩化物イオン 拡散係数(cm<sup>2</sup>/年) 深さ 5~15mm間 ● ● 15~25mm間 •••••25~35mm間 N55 10 - 35~45mm間 N65 5 N45 0 15 B45 B55 B65 拡散係数(cm<sup>2</sup>/年) 10 植た物とオン 5 0 200 400 600 0 200 400 6000 200 400 600 0 凍結融解サイクル 凍結融解サイクル 凍結融解サイクル 図-7 塩化物イオン拡散係数の経時変化 図にはすべてのサイクル、 塩化物イオン量の実測値(kg/m3) すべての深さのデータを 一括してプロットしている 10 (凍害を受けたコンクリート) 1.2kg/m3 N45 ▲N55 N65 1 °\_ **□**B45 ∧ B55 **O**B65 Ð Λ ΔO 0.1 0.1 10 1 塩化物イオン量の予測値(kg/m<sup>3</sup>) (凍害の影響を考慮) 図-8 塩化物イオン量の予測値と実測値の比較 (予測値は凍害の影響を考慮した値)

鑑み,一般的な1.2kg/m<sup>39</sup>とした。予測が1.2kg/m<sup>3</sup>未満で も実測値が1.2kg/m<sup>3</sup>を上回るプロットがいくつか確認さ れ,予測は実測値を過小評価していると言える。

次に、凍害の進行に応じて経時的に変化させた塩化物 イオン拡散係数を用いて式(4)による予測を行い、凍結融 解を与えた場合の実測値との比較を行った。図-7に深 さ5~45mm間の各層における塩化物イオン拡散係数の 経時変化、図-8に予測値と実測値の比較を示す。塩化



物イオン拡散係数の経時変化は式(5)で表現した。塩化物 イオン拡散係数に及ぼす凍害の影響は、N55の深さ5~ 15mm間,N65の深さ5~35mm間,B65の深さ5~25mm間 において確認された。予測が1.2kg/m<sup>3</sup>未満の範囲に着目 すると、実測値が1.2kg/m<sup>3</sup>を上回っているプロット数は 図ー6に比べると減少していることがわかる。予測値と 実測値の相関係数R<sup>2</sup>を調べたところ、図ー6は0.80、図ー 8は0.93でばらつきの改善が確認された。なお、図ー8は 図ー6に比べ、実測値が0.2kg/m<sup>3</sup>以下の範囲に予測値が広 範に多くプロットされている。これは塩化物イオン量が 少なかった内部の浸透を予測式がより安全に評価したこ とを示す。環境がJIS A 1148よりも緩やかなASTM C 672 に準じた条件下でも、式(4)、式(5)の有効性が確認された。

## 5. 凍害を考慮した塩化物イオン拡散係数の経時変化の 設定に関する考察

2章で述べた内容に沿って、図-4で示した凍害(スケ ーリング,相対動弾性係数)の進行予測曲線と、図-7で 示した塩化物イオン拡散係数の経時変化の直線を用いて、 凍害の発生状況と塩化物イオン拡散係数の増加比との関 係(図-2)を整理した。ここでは代表して、深さ5~15mm 間,深さ15~25mm間について整理した。

図-9は深さ5~15mm間の塩化物イオン拡散係数が凍 害を受ける前すなわち当初の値の2,10,50,100,300 倍に増加した時のスケーリング量と深さ10mmの相対動 弾性係数の状況を整理したものである。ここでは,凍害 の影響が確認されたN55,N65,B65の3つを△のマーカ ーでプロットした。なお,スケーリングとひび割れ(相 対動弾性係数)が同時に発生・進行しているコンクリート の状態を表す曲線については明示を省略している。

既報<sup>10,11</sup>はスケーリングの影響を除外した条件下で, 同一供試体に凍結融解を連続的に与えて相対動弾性係数 の低下に伴う塩化物イオン拡散係数の変化を調べ,増加 比は相対動弾性係数が大きく低下しても最大で2倍以下 であった結果を示している。本論文ではこの知見も考慮 し,増加比が2倍に至った時の状況を表した図(図-9の 一番左)では,既にプロットした3点に(x, y)=(SC,深さ 10mmの $RE_d$ )=(0,0)を加えた4点が収まるように下限線 を引いて増加比が2倍以上となる領域を塗りつぶして表 示した。10,50,100,300倍に至った時の図では,安全 側の設計法を提案する観点から,既にプロットした3点が 収まるように原点を通過する下限線を引き,増加比が10, 50,100,300倍以上となる領域を塗りつぶして表示した。

図-10は深さ15~25mm間の塩化物イオン拡散係数が 当初の2, 10, 50, 100, 300倍に増加した時の,深さ5~ 15mm間の塩化物イオン拡散係数の増加比と深さ20mm の相対動弾性係数の状況を整理したものである。ここで は,凍害の影響が確認されたN65, B65の2つを $\triangle$ のマー カーでプロットした。ここでも安全側の設計法を提案す る観点から,既にプロットした2点が収まるよう,(x, y) =(深さ5~15mm間の拡散係数の増加比,深さ20mmの  $RE_d$ )=(1, 0)を通過する下限線を引き,増加比が2, 10, 50,100,300倍以上となる領域を塗りつぶして表示した。

図-9,10を重ね合わせると、図-2で示した凍害の発



生状況をもとに深さ5~15mm間,深さ15~25mm間にお ける塩化物イオン拡散係数の増加比を安全側に設計する 図として図-11,12が得られる。この図に凍害が発生・ 進行しているコンクリートの状態を表す曲線を書き込む ことで塩化物イオン拡散係数の経時変化を定量的に設定 することが可能となる。なお、図-7で塩化物イオン拡散 係数に変化がみられなかったN45,B45,B55のデータは 図-9,10に示さなかったが、図-4で示したようにB45, B55はN55と同程度以上のスケーリング量で,相対動弾性 係数の差も小さいことから、B45,B55における塩化物イ オン拡散係数の増加はN55よりも大きな凍害の発生・進 行が前提条件となる。このことから図-11,12を用いる ことで安全側の設計・評価は確実に実行できると言える。

ここで、前掲した深さ15~25mm間の拡散係数の増加 比が2倍に増加した時の図(図-10の一番左)に、文献 1)で報告したJIS A 1148に準じた実験のデータを●でプ ロットした(W/C=45~65%)ところ、塗りつぶした領 域の外に表示された。これは深さ20mmの相対動弾性係 数が同じで、深さ5~15mm間の拡散係数の増加比が比較 的小さい場合、深さ15~25mm間の拡散係数の増加比に 及ぼす影響は、ASTM C 672に準じた環境下では小さいも のの、JIS A 1148に準じた環境では大きいことを意味する。 本論文ではASTM C 672に準じた環境を対象に結果を整 理したが、コンクリートが受ける環境の厳しさ(例えば、 凍結融解の程度が大きい場合、凍結融解の途中で乾燥・ 乾湿<sup>13)</sup>を受ける場合など)に応じて図-11、12を補正す る必要があると言える。この検討は今後の課題としたい。

## 6. まとめ

ASTM C 672 に準じた環境下で凍害の状況と塩化物イオン拡散係数の増加比の関係を調べ,以下の知見を得た。

- (1) スケーリングによる表層欠損等の凍害の影響により、 供給された塩水の多くは表層を透過し、内部へ浸透 しやすくなる。
- (2) 凍害の発生状況をもとに深さ 5~15mm 間,深さ 15 ~25mm 間における塩化物イオン拡散係数の増加比 の経時変化を安全側に設計する考え方を示した。

今後は曝露実験等を通じ、今回 ASTM C 672 で得た傾向と実環境での傾向の関係を比較・整理する予定である。

## 参考文献

- 遠藤裕丈,田口史雄,田畑浩太郎:寒冷環境下での 塩化物イオン浸透予測技術に関する基礎的研究,コ ンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.913-918, 2013.7
- JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」, 解 説, 2001
- 3) 遠藤裕丈:凍結融解と塩化物の複合作用によるスケ ーリングに対する耐久性設計法に関する研究,北海 道大学博士学位論文,pp.99-101,2011.3
- 4) 野口博章:凍結融解作用を受けるコンクリートの劣 化予測に関する基礎的研究,法政大学博士学位論文, p.32,2007.9
- 5) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書「設 計編」, p.149, 2013.3
- 6) 土木学会:2013年制定コンクリート標準示方書「維持管理編」, p.171, 2013.10
- 7) 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
- 8) 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
- 2) 社団法人日本コンクリート工学協会:コンクリート 診断技術'13「基礎編」, p.197, 2013.2
- 10) 社団法人日本コンクリート工学協会北海道支部:凍 害と耐久性設計研究委員会報告書, p.194, 2008.10
- 平成20年度独立行政法人土木研究所重点プロジェクト研究成果報告書11.2「コンクリートの凍害,塩害との複合劣化挙動及び評価に関する研究」
- 遠藤裕丈,島多昭典:コンクリートの凍・塩害の進行に及ぼす夏季高温期の影響に関する基礎的研究, 寒地土木研究所月報,No.740, pp.13-25, 2015.1