

## 15.4 凍害の各種劣化形態が複合したコンクリート構造物の性能評価法の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地保全技術研究グループ（耐寒材料）、技術開発調整監付（寒地技術推進室）

研究担当者：島多昭典、三原慎弘、遠藤裕丈、清野昌貴、山田正二、川村浩二、横山博之、高玉波夫、市川清一、藤田祐司、高田尚人、太田日出春、渡辺淳、鈴木哲

### 【要旨】

寒冷地のコンクリート構造物は、凍害によるスケーリングとひび割れおよび塩化物イオンの供給を同時に受けやすい。このため、凍害の影響が考慮された適切な性能評価技術が求められる。平成 26 年度は、凍害による各種劣化形態が複合的に生じたコンクリートの性能評価法の提案に向け、凍害の予測に関する研究として、環境の変遷を考慮した凍害予測、実構造物の凍害の進行に及ぼす材料・環境因子の影響の分析評価を行った。また、塩化物イオンの浸透性への影響に関する研究として、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・評価法の体系化の検討、寒冷環境下の道路橋橋台での塩化物イオンの浸透状況の調査を行った。

キーワード：凍結融解、スケーリング、ひび割れ、塩化物イオン、性能評価

### 1. はじめに

コンクリート構造物の長寿命化を適切かつ効率的に図るには、合理的な耐久性設計を行うことが重要である。そのためには、劣化状況の実態に即した劣化予測方法を整備する必要がある。

寒冷地におけるコンクリートの代表的な劣化として、凍結融解と塩化物（海水や凍結防止剤）の複合作用による凍害、塩害が挙げられる。現在の凍害の評価は相対動弾性係数で示されるひび割れ<sup>1)</sup>が単一の劣化として進行することを前提としている。また、塩害に関しては、一般的に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における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）を常時一定とした Fick の拡散方程式の第 2 法則の解に従うと仮定した簡便な劣化予測が行われている<sup>2)</sup>。しかし、実際は凍結融解を受けるとひび割れに加えてスケーリングが同時に発生・進行する場合が殆どであり、さらに塩化物イオンの供給も同時に起こる。このためスケーリングによる断面減少に伴う鉄筋かぶりの減少やひび割れによる塩化物イオンの浸透のしやすさ等の影響が適切に考慮された合理的な劣化予測方法が求められる。

本研究では、凍害の劣化形態として広く見られるスケーリングとひび割れが複合的に発生した場合のコンクリートの耐久性能を適切に評価できる方法の提案に向け、実験および構造物調査を進めている。平成 26 年度は凍害の進行予測式および塩化物イオン浸透に関する評価式の開発に向け、下記の 5 項目に関する種々の実験・調査を行った。

- ・スケーリング・ひび割れが複合化した凍害の進行性の評価（複合劣化実験①）
- ・塩化物イオンの浸透性への影響の評価（複合劣化実験②）
- ・実構造物における凍害の進行性および塩化物イオンの浸透性の評価（構造物調査）
- ・現地データ解析による、実験式の補正に基づく、凍害の進行予測式および塩化物イオンの浸透に関する評価式の開発
- ・評価法の体系化および評価フローの検討

### 2. スケーリング・ひび割れが複合化した凍害の進行性の評価（複合劣化実験①）

寒冷地の道路コンクリート構造物は、凍結融解と凍結

表-1 コンクリートの配合

記号	セメント	W/C (%)	単用量(kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	S	G
N55	普通	55	146	265	871	1067
B55	高炉	55	147	267	865	1061

W/C: 水セメント比, W: 水, C: セメント, S: 細骨材, G: 粗骨材  
 普通: 普通ポルトランドセメント, 高炉: 高炉セメントB種

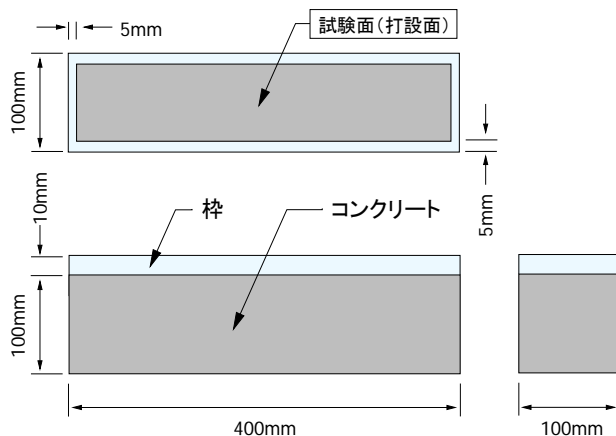


図-1 供試体

防止剤の複合作用を受けやすい環境に曝されている。一方、凍結防止剤の散布量は、スパイクタイヤの使用が規制された1991年以降、増加し続けた<sup>3)</sup>。すなわち、これよりも前に建設された構造物の環境は1991年を境に大きく変化している場合が多く、実務において凍害予測を適切に行うには、このような環境条件の変化に十分留意する必要がある。しかし、一般にコンクリートの凍結融解抵抗性の評価においては、凍結融解試験の途中で試験水の種類は変更しない。基本的には同じ種類の試験水を継続的に使用しており<sup>4)</sup>、環境の変遷を考慮した凍害予測技術に関する知見は少ないのが現状である。

そこで、環境の変化に見立てた実験を行い、環境の変遷を考慮した凍害予測技術について検討した。さらに後述する3章では、この2章で得た成果を活用して、凍害を受けた道路橋の橋台での凍害調査を実施した。

## 2. 1 実験概要

### 2. 1. 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。水セメント比は55%とし、セメントは普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種を使用した。目標スランプは8±2.5cm、目標空気量は4.5±1.5%に設定し、練混ぜにおいては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)と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。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

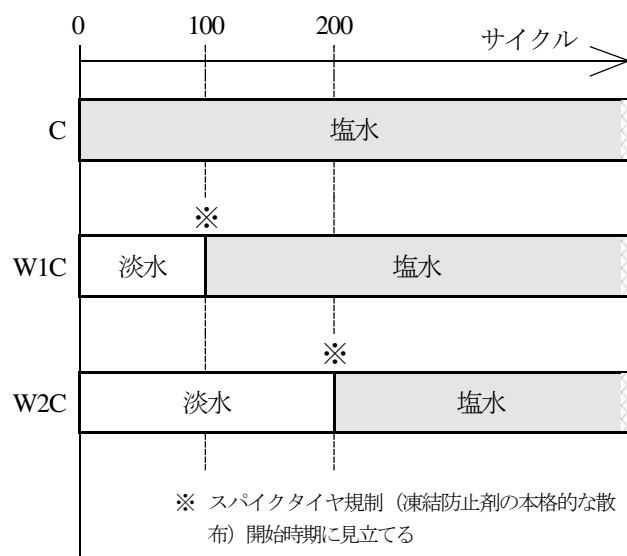


図-2 凍結融解試験で供試体に与える環境条件

粒率2.85、除塩処理済み)、粗骨材は小樽見晴産の碎石(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。各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した。

### 2. 1. 2 供試体

図-1に供試体を示す。供試体は100×100×400mmの角柱とし、材齢7日まで湿った麻布で覆った後、材齢28日まで温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室に静置した。また、静置期間中に発泡スチロールを使用して高さ10mm、幅5mmの枠を作製し、材齢21日にエポキシ樹脂とシリコーンを用いて作製した枠を供試体の表面(100×400mm、以下、試験面と記す)に据え付けた。

### 2. 1. 3 凍結融解試験

この実験では、部材の表面から水分が供給される実構造物の状態を模擬した形で評価を行うこととし、ASTM C 672に準じた凍結融解試験を行うこととした。供試体の試験面に試験水を深さ6mm張って-18℃で16時間、23℃で8時間の1日1サイクルの凍結融解作用を与えた。ここでは劣化を促進させる理由から、試験面は比較的脆弱となりやすい打設面とした。

凍結融解試験で供試体に与える環境条件を図-2に示す。本研究では3種類の条件(C、W1C、W2C)を準備した。Cは、スパイクタイヤ使用規制後に建設された構造物を想定したもので、試験水は凍結防止剤に見立てた濃度3%の塩化ナトリウム水溶液(以下、塩水と記す)を継続的に使用した。W1Cは、スパイクタイヤの使用が規制される前に建設された構造物を想定したものである。

ここでは仮にスパイクタイヤ使用規制時期を 100 サイクルと見立て、100 サイクル以前は淡水、100 サイクル以降は塩水を使用した。W2C は建造時期が古く、供用開始からスパイクタイヤの使用が規制されるまでの期間が比較的長い構造物を想定したものである。ここでは、スパイクタイヤの使用規制開始に見立てた時期を W1C の倍の 200 サイクルに設定し、試験水は、200 サイクル以前は淡水、200 サイクル以降は塩水を使用した。供試体に与える凍結融解のサイクル数は、いずれの条件も塩水による凍結融解は 300 サイクル与えることとし、C は 300 サイクル、W1C は 400 サイクル、W2C は 500 サイクルとした。

凍結融解試験では平均欠損深さ、スケーリング量、相対動弾性係数の測定を行った。平均欠損深さはスケーリング発生箇所における欠損深さを 5 点測定し、その平均をとった。スケーリング量は試験面から剥離片を採取し、110°C で乾燥させた後、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を使用して求めた。供試体を挟む形で供試体の側面 (100×400mm) に超音波の発・受振子をあてて深さ 10、20、…、90mm の超音波伝播速度を測定し、式(1)<sup>9)</sup>、(2)より各深さの相対動弾性係数を求めた。

$$E_{dn} = 4.0387V_n^2 - 14.438V_n + 20.708 \quad (1)$$

$$RE_d = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \times 100 \quad (2)$$

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  $n$  サイクルの超音波伝播速度(km/s)、 $RE_d$  は  $n$  サイクルの相対動弾性係数(%）、 $E_{d0}$  は凍結融解を受けていないコンクリートの動弾性係数(GPa)である。一般に  $E_{d0}$  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、試験水を張って同じ期間、常温下に曝した供試体の動弾性係数を  $E_{d0}$  とすることとした。

なお測定値は、いずれも供試体 3 個の平均とした。

### 2. 1. 4 凍害予測の考え方

同じ種類の試験水を継続的に使用して凍結融解試験を行った過年度の研究において、凍害の進行予測としてスケーリングは式(3)<sup>9)</sup>、相対動弾性係数は式(4)<sup>7)</sup>が示されている。図-3 に予測の概念を示す。

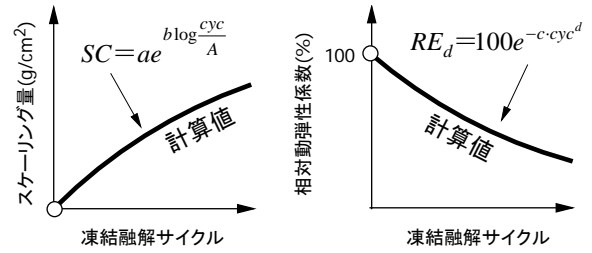


図-3 過年度の研究で示された凍害予測の概念<sup>6)、7)</sup>

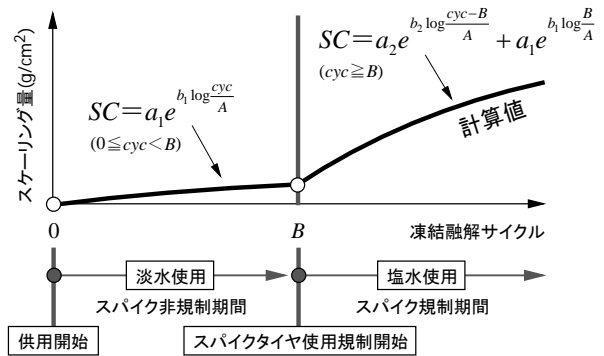


図-4 環境の変遷を考慮したスケーリング予測の考え方

$$SC = ae^{b \log \frac{cyc}{A}} \quad (3)$$

$$RE_d = 100e^{-c \cdot cyc^d} \quad (4)$$

ここに、 $SC$  はスケーリング量( $g/cm^2$ )、 $cyc$  は凍結融解サイクル ( $cyc \geq 1$ )、 $A$  はサイクルを無次元化させるための係数 (一般に凍結融解期間の  $1/2$ )<sup>9)</sup>、 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  は条件によって定まる係数である。なお、 $cyc=0$  の場合は  $SC=0.0g/cm^2$ 、 $RE_d=100\%$  とする

Stark ら<sup>8)</sup>は、塩水による凍結融解試験を行った場合、淡水の場合と比較すると、表面で大きなスケーリングが進行する一方、特記すべき内部劣化は生じない知見を述べている。竹田ら<sup>9)</sup>の研究でも、質量減少率は塩水を使用した方が多いのに対し、相対動弾性係数の低下速度は塩水と淡水で質量減少率ほどの顕著な差はさほど見受けられない実験結果が示されている。

以上の知見をふまえ、ここでは図-4 に示すように、スケーリングは式(3)の概念を基本としつつ、スパイクタイヤ使用規制前・以降、それぞれにおいて式(3)を構成する係数を使い分けた式(5)、(6)による予測を試みる。

$$SC = a_1 e^{b_1 \log \frac{cyc}{A}} \quad (1 \leq cyc < B) \quad (5)$$

$$SC = a_2 e^{b_2 \log \frac{cyc-B}{A}} + a_1 e^{b_1 \log \frac{B}{A}} \quad (cyc \geq B) \quad (6)$$

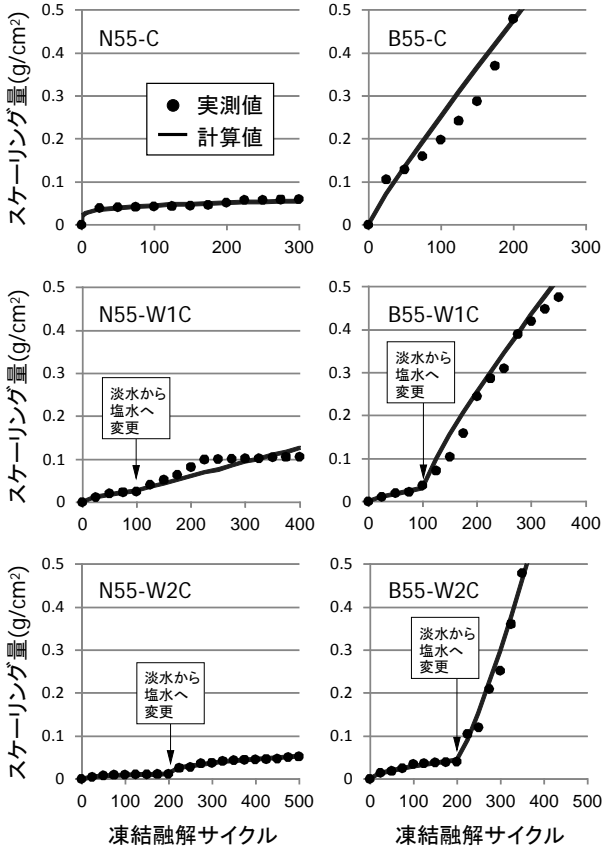


図-5 スケーリング量の測定結果

ここに、 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$ は係数、 $B$ はスパイクタイヤ使用規制開始に見立てた、試験水を淡水から塩水に切り替える時のサイクルである。

一方、相対動弾性係数は、試験水の影響は小さいと仮定し、スパイクタイヤ使用規制前と以降で式(4)に含まれる係数の使い分けは行わず、式(4)のみで予測を試みる。

2.2 実験結果と予測比較

図-5 にスケーリング量の測定結果を示す。セメントの種類で比較すると、いずれの環境条件も高炉セメントB種を使用した方がスケーリング量は多くなっており、既往の知見<sup>10)</sup>と対応している。環境条件W1C、W2Cにおいては、100サイクルもしくは200サイクルに試験水を淡水から塩水に変更したところ、いずれもスケーリングの発生速度が増加に転じ、スケーリング量が大きくなる傾向が示された。このことは、スケーリングの予測に際しては環境条件の変遷を考慮する必要があることを示唆している。この実験結果を図-4で示した考え方に基づいて解析した結果を図-5(計算値)および表-2に示す。Aについては最小試験期間である条件Cの300サイクルの平均をとって150とした。計算値は実測値と非常に良く対応しており、予測の考え方の適合性が確認された。

表-2 スケーリング予測式の係数

記号	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$
N55-C	—	—	0.05	0.43
N55-W1C	0.03	1.24	0.05	2.25
N55-W2C	0.01	0.86	0.03	1.00
B55-C	—	—	0.37	2.11
B55-W1C	0.05	1.86	0.31	1.99
B55-W2C	0.04	1.27	0.41	2.79

予測式は式(5)、(6)、Aは150(全条件)、Bは条件Cが0、条件W1Cが100、条件W2Cが200

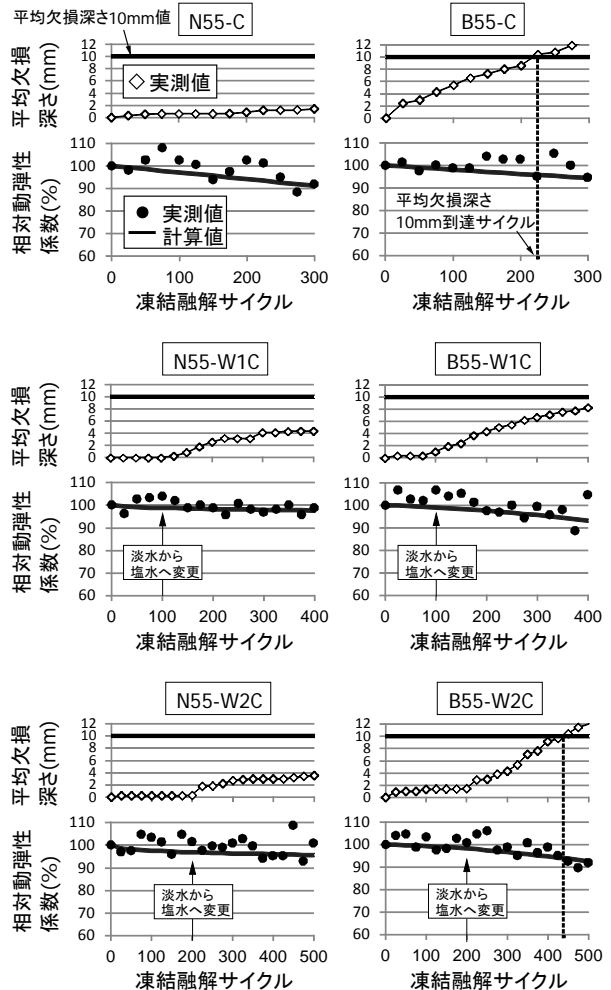


図-6 平均欠損深さおよび深さ10mm位置における相対動弾性係数の測定結果

図-6は相対動弾性係数の測定結果である。ここでは代表して、深さ10mm位置の測定結果を示す。今回の実験では、いずれの供試体においても試験期間全体を通じて90%以上の高い値を示した。AE減水剤の使用によってコンクリート内部に導入されたエントレインドエアが凍結膨張圧の緩和に効果的に作用したことが影響していると考えられる。W1Cは100サイクル、W2Cは200サイクルに試験水を淡水から塩水に変更しているが、図-5とは

表-3 相対動弾性係数予測式の係数

記号	c	d
N55-C	0.0002	1.07
N55-W1C	0.001	0.50
N55-W2C	0.004	0.37
B55-C	0.0002	1.03
B55-W1C	0.000007	1.54
B55-W2C	0.000003	1.65

予測式は式(4)、値は深さ10mm位置のもの

対照的に相対動弾性係数の低下速度が大きく変化する様子は確認されなかった。さらに、深さ10mmの相対動弾性係数は、表面欠損が深さ10mm近くまで進行しても値が急速に低下する兆候は見受けられず、AEコンクリートにおいて塩水による凍害の促進は実質的にコンクリート表面で限定的に生じやすいとする Stark ら<sup>8)</sup>の知見と良く対応する結果となった。式(4)に基づいて求めた相対動弾性係数の計算値と実測値との対応を同じく図-6、解析により求めた式(4)の係数を表-3に示す。計算値は実測値と非常に良く対応する結果が示された。

### 3. 実構造物調査のデータ解析による凍害の進行予測式の開発

寒冷環境下に位置する北海道の道路橋の橋台で凍害調査を行い、2章で得た知見を活用した凍害の進行性評価を実施した。さらに、凍害の進行に及ぼすコンクリート材料および道路橋が曝される環境の影響を把握するための回帰分析を試みた。

#### 3.1 研究の進め方

##### 3.1.1 凍害の進行性評価

2章の室内実験では、剥離片の質量でスケーリングの程度を評価した。しかし、構造物で剥離片の質量を測定することは困難である。このため、スケーリングの程度を表す指標として、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委員会<sup>11)</sup>が提案する、剥離深さと剥離面積率の積で定義される剥離度を用いることとする。

$$D_m = D \times A_s = D \times \frac{S}{50 \times 50} \quad (7)$$

ここに、 $D_m$ は剥離度(mm)、 $D$ は平均剥離深さ(mm)、 $A_s$ は剥離面に据え付けた50×50cm枠内に占める剥離面積率、 $S$ は50×50cm枠内の剥離面積(cm<sup>2</sup>)である。

凍害予測は、2章で得た知見をふまえて、図-7に示す概念に基づいて式(8)~(10)により行う。

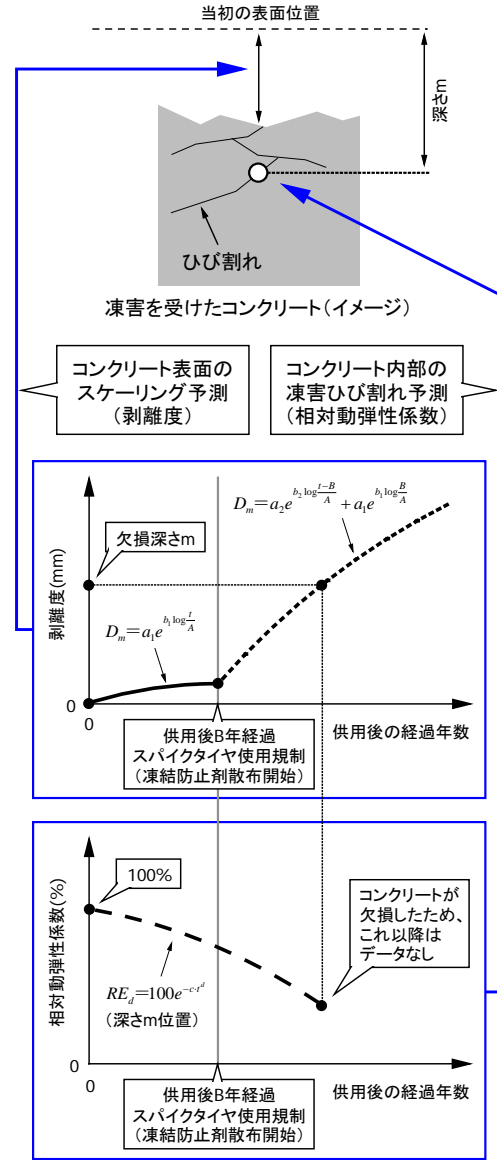


図-7 凍害予測の概念

$$D_m = a_1 e^{b_1 \log \frac{t}{A}} \quad (\text{散布開始前}) \quad (8)$$

$$D_m = a_2 e^{b_2 \log \frac{t-B}{A}} + a_1 e^{b_1 \log \frac{t}{A}} \quad (\text{散布開始以降}) \quad (9)$$

$$RE_d = 100 e^{-c t^d} \quad (\text{欠損に至るまで}) \quad (10)$$

ここに、 $t$ は凍結融解履歴(ここでは供用後の経過年数(年)をあてることとする。なお、 $t \geq 1$ とし、 $t=0$ の場合は $D_m=0\text{mm}$ 、 $RE_d=100\%$ とする)である。 $A$ 、 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c$ 、 $d$ は2章に同じく、時間を無次元化させるための係数および材料や環境など諸条件によって定まる係数である。 $B$ の凍結防止剤散布開始時期については、ス



パイクタイヤの使用が規制された西暦 1991 年を境に設定することとする。

### 3. 1. 2 回帰分析

既往の研究では、表層が脆弱でかつ透水性が小さいコンクリートほど、表層に水が多く供給されるとともに、凍結した表層から未凍結層への凍結余剰水の移動が阻害されやすくなるため表層で凍結圧が集中的に高まり、スケーリングが生じやすくなることが明らかになっている。そして、スケーリングの進行速度を表す指標として、表層の脆弱性を表す水セメント比と、透水性を表す透水係数を組み合わせた式(11)が提案されている<sup>12)</sup>。

$$\omega = \left( \frac{W/C}{45} - 1.67 \right) \left( \frac{k}{3.5 \times 10^{-10}} + 2.31 \right) \quad (11)$$

ここに、 $\omega$  はスケーリングの進行速度を表す指標値、 $W/C$  は水セメント比(%),  $k$  は透水係数(cm/s)である。

相対動弾性係数については、耐凍害性を表す指標として細孔水の凍結による膨張に対する抵抗要因である圧縮強度、気泡間隔係数、細孔に占める凍結水量を組み合わせた式(12)が提案されている<sup>13)</sup>。

$$\beta = \left( \frac{f_c}{300} \right)^{0.019} \times \left( \frac{L}{0.5} \right)^{-0.903} \times \left( \frac{V_f}{V_0} \right)^{-0.107} \quad (12)$$

ただし、 $\beta$  は耐凍害性指標値、 $f_c$  はコンクリートの圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>),  $L$  は気泡間隔係数(mm),  $V_f$  は凍結水量(cc/g),  $V_0$  は総細孔量(cc/g)である。

既往の研究では、 $\omega$  が大きいほどスケーリングは進行しやすいこと、また、 $\beta$  が小さいほど相対動弾性係数は低下しやすいことが実験的に確認されている<sup>12), 13)</sup>。

ここでは、式(8)~(10)の各係数と、式(11)、(12)に示した材料因子および凍結融解の程度や凍結防止剤の散布量などの環境因子との関係を回帰分析により調べる。

## 3. 2 調査概要

### 3. 2. 1 調査箇所

図-8 に調査路線を示す。図に併記している凍害危険度は、凍結融解回数などの気象データを基に凍害発生の危険性を地域ごとに定めた評価値<sup>14)</sup>である。調査路線は凍害危険度3~5に位置し、冬期は凍結防止剤が散布されている。調査路線の総延長は約 540km で 177 橋の道路橋が架設されている。

調査対象は橋台とした。はじめに 177 橋の橋台で表面

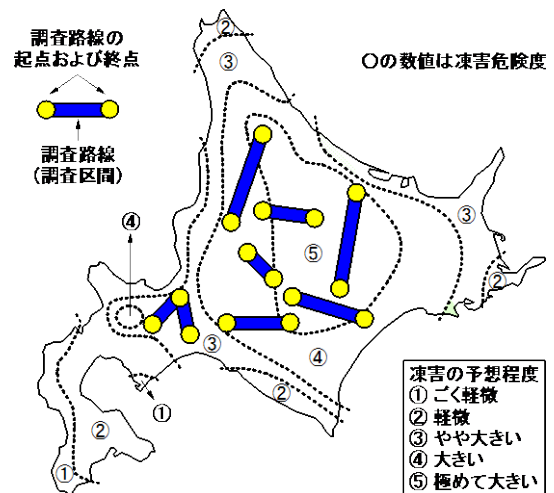


図-8 調査路線

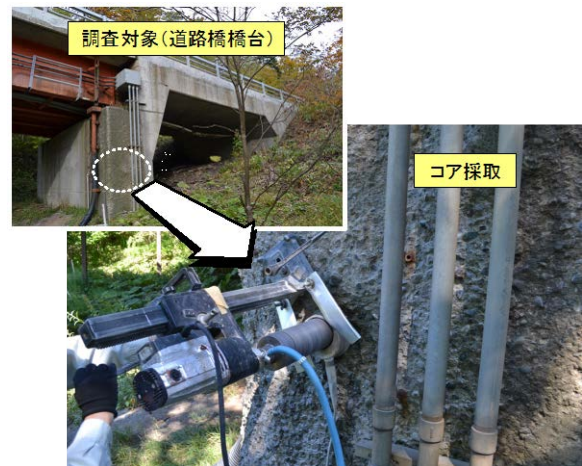


写真-1 コア採取の様子

観察を行った。次にその結果をもとに凍害が大きいと疑われる道路橋を抽出した。そしてその中から代表して 28 橋を選定し、その橋台を対象に、凍害発生箇所より  $\phi 10 \times 10$ cm コアを 1 本、外見上、健全な箇所より  $\phi 10 \times 30$ cm コアを 2 本、 $\phi 10 \times 35$ cm コアを 1 本採取した。写真-1 にコア採取の様子を示す。

### 3. 2. 2 調査内容

#### (1) 凍害の状況に関する調査

凍害の状況を定量的に把握するため、剥離度ならびに相対動弾性係数の測定を行った。

剥離度は、凍害発生箇所の表面に 50×50cm の枠を据え付け、枠内のスケーリング面積と剥離深さを測定した。剥離深さはスケーリングが大きい範囲を対象に 10 点測定し、その平均を測定値とした。そして、式(7)に代入して剥離度を求めた。

相対動弾性係数の測定は図-9 に示すように、凍害発生

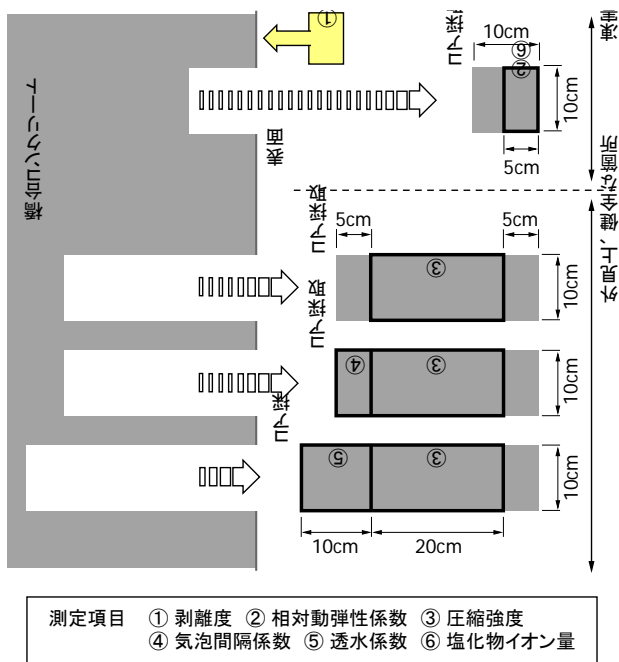


図-9 調査内容

箇所から採取したコアを用いて行った。コアを挟む形で超音波（周波数 28kHz）の発・受振子をコア側面に深さ 1cm 間隔であてて超音波伝播速度を測定し、式(1)、(2)より建設当初の面から深さ 0~5cm 間の相対動弾性係数を求めた。超音波伝播速度は図-9 に示した全てのコアの全深さを対象に測定し、最大速度から求めた動弾性係数を  $Ed_0$  とした。

(2) 材料因子に関する調査

式(11)、(12)に鑑み、橋台コンクリートの圧縮強度、気泡間隔係数、透水係数の測定を行った。

ここでは外見上、健全な箇所の内部を建設当初から品質が大きく変化していない箇所とみなし、図-9 に示す部分を用いて JIS A 1107 に準じた圧縮強度の測定、ASTM C 457 に準じた気泡間隔係数の測定、インプット法に準じた透水係数の測定を行った。

なお、 $\omega$ 、 $\beta$ を求めるには、さらに水セメント比、凍結水量、総細孔量が必要となる。水セメント比は、配合記録が残されていないため圧縮強度から推定することとした。一般にセメント水比と圧縮強度は直線関係にある<sup>15)</sup>。ここでは、室内実験（養生 3~7 日）で図-10 に併記する式が示され、北海道内の防波堤での調査データもこの近傍にプロットされた既報<sup>12)</sup>の実績を参考に、橋台で取得したデータもこの近傍にプロットされると仮定し、図-10 の式を用いて圧縮強度からセメント水比を計算して水セメント比を推定し、 $\omega$  を求めた。凍結水量は、実環境の温度履歴は実験室のように一様でないため把握は困難で

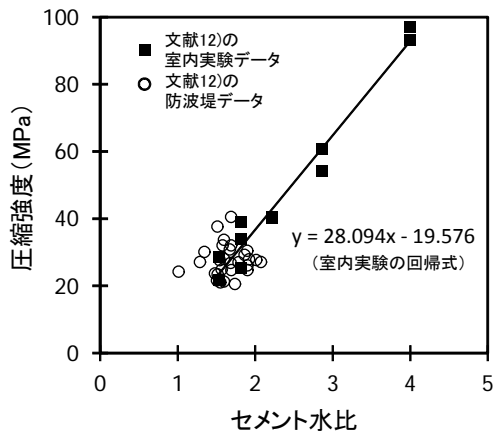


図-10 セメント水比と圧縮強度の関係<sup>12)</sup>を参考に作成

ある。このため  $\beta$  は算出せず、回帰分析は圧縮強度と気泡間隔係数に着目して行うこととした。

(3) 環境因子に関する調査

環境因子については、凍結融解の程度と凍結防止剤の散布量および塩化物イオンの供給量に着目した。

濱らは、凍結融解の厳しさを定量的に表す指標値として、式(13)に示す地域係数を提案している<sup>16)</sup>。

$$T = -t_{a\min} \left( 1 - \left[ \frac{D_f}{D_w} \right] \right) \tag{13}$$

ここに、 $T$  は地域係数、 $t_{a\min}$  は年間最低温度(°C)、 $D_w$  は凍結持続日数を含めた凍結融解の開始日から終了日までの総日数(日)、 $D_f$  は凍結融解の開始日から終了日までの期間における凍結持続日数(日)である。

地域係数は、凍結融解の環境が厳しいほど大きくなる。ここでは道路橋近傍のアメダスから地域係数を求め、これを凍結融解の程度を表す因子にあてた。凍結融解日数、凍結持続日数は、コンクリートの凍結温度とされる $-2^{\circ}\text{C}$ <sup>17)</sup>を凍結点として求めた。

北海道における凍結防止剤の年間散布量は、スパイクタイヤの使用が規制される 1991 年以前は比較的少なかったが、1991~2003 年は概ね一定割合で増え続け、2003 年以降は同程度の値で推移する傾向にある<sup>3)</sup>。今回調査を行った路線では、道路管理者が 2007 年に凍結防止剤の年間散布量を調査している。このデータを使用し、年間散布量は 1991 年から 2003 年にかけて直線的に増え、2003 年以降は一定となるような図-11 のグラフを仮定し、網掛けの面積から得られる現在までの総散布量を塩化物イオン量に換算することで、供用後、これまで散布された橋長 1m あた

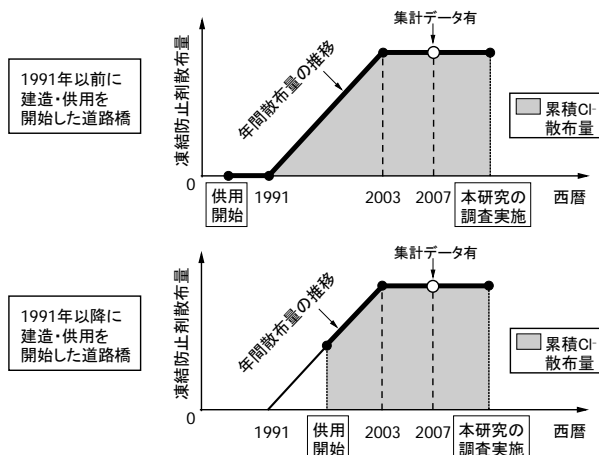


図-11 累積 Cl 散布量の算出方法

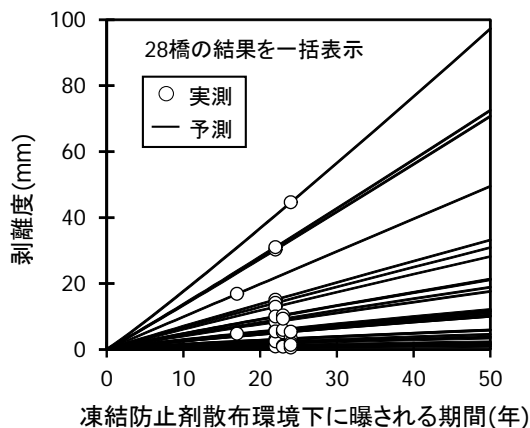


図-12 剥離度の予測

りの塩化物イオン量（以下、累積 Cl 散布量と記す）を求めた。

さらに、橋台への凍結防止剤を含む融雪水の供給の実態を直接的に把握するため、橋台の塩化物イオン量も調べた。凍害発生箇所から採取したコアを用いて、JIS A 1154 の硝酸銀滴定法に準じ、剥離面から深さ 0~5cm における塩化物イオン蓄積量を測定した。

### 3. 3 調査結果・考察

#### 3. 3. 1 凍害の進行状況

今回の調査で得た実測値から求めた剥離度および建設当初の面から深さ 5cm における相対動弾性係数の予測を図-12、13 に示す。図-12 の予測は式(9)、図-13 の予測は式(10)によるものである。図には 28 橋の結果を一括表示した。ここではスパイクタイヤ使用規制以降におけるスケーリングの進行を安全側に予測するため、スパイクタイヤ使用規制前の剥離度をゼロとした。そのため、見やすく表示するため、図-12 の横軸は供用後の経過年数ではなく、散布環境下に曝される期間としている。散布環境下に 15~25 年曝された橋台の剥離度は、28 橋中 11 橋が 5mm 未満、14 橋が 5~20mm、3 橋が 20mm 以上であった。今後、引き続き散布環境下に 50 年曝された場合、剥離度が 20mm を上回る橋は 9 橋に増える予測結果もあわせて示された。一方、深さ 5cm の相対動弾性係数は、28 橋中 11 橋で供用開始から 50 年目に長さ変化が急激に大きくなる 85%<sup>18)</sup> を下回った。また、このうち 3 橋は供用途中で剥離度が 50mm に達し、これらは剥離面積率が 100% であったため剥離深さが 50mm、すなわち欠損に至る予測結果が示された。

#### 3. 3. 2 材料・環境因子の影響の重みの評価

表-4 は、今回行った橋台での調査において得られた剥離度および建設当初の表面から深さ 1、2、3、4、5cm に

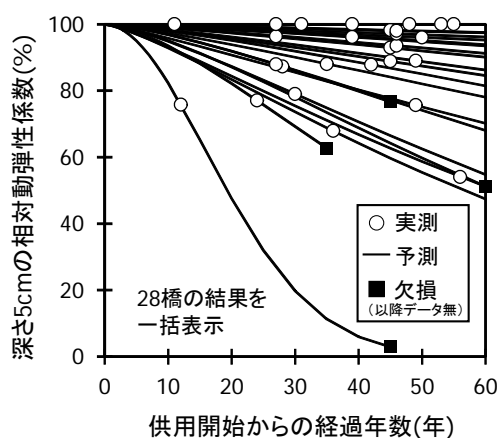


図-13 深さ 5cm の相対動弾性係数の予測

における相対動弾性係数の予測式の諸係数、材料因子である式(11)の  $\omega$ 、圧縮強度、気泡間隔係数、環境因子である地域係数、累積 Cl 散布量、剥離面から深さ 0~5cm における塩化物イオン蓄積量の結果をまとめたものである。

式(8)、(9)で示した剥離度の予測式については、ここでは前提条件として、スパイクタイヤ使用規制前の剥離度をゼロとしているため  $a_1$ 、 $b_1$  はゼロとなる。そのため、表には  $a_2$ 、 $b_2$  のみ掲載している。A については、既往の研究<sup>6)</sup> にならい、散布環境下に曝された期間である約 20 年の中間をとって 10 とした。

図-14 に示すように、剥離が進行しやすいほど剥離度予測式の係数  $a_2$  は大きく、相対動弾性係数が低下しやすいほど相対動弾性係数予測式の係数  $c$  は大きく表示される。そこで表-4 に示す  $a_2$ 、 $c$  と材料因子、環境因子との関係について回帰分析を行った。

$a_2$  は式(14)を設定し、材料因子としてスケーリングの進行速度を表す指標値  $\omega$ 、環境因子として地域係数  $T$  と累積 Cl 散布量  $D_C(\text{kg/m})$  に着目し、関係を調べた。また、



表-4 各橋における凍害の進行予測式の諸係数、材料因子、環境因子

橋	凍害の進行予測式の諸係数												材料因子			環境因子		
	剥離度		相対動弾性係数										$\omega$	圧縮強度 (MPa)	気泡間隔係数 (mm)	地域係数	累積CI散布量 (kg/m <sup>3</sup> )	塩化物イオン蓄積量 (kg/m <sup>3</sup> )
	$a_2$	$b_2$	$c$ ( $\times 10^3$ )					$d$										
		深さ 1cm	深さ 2cm	深さ 3cm	深さ 4cm	深さ 5cm	深さ 1cm	深さ 2cm	深さ 3cm	深さ 4cm	深さ 5cm							
1	7.1	2.2	5.1	3.4	1.3	1.3	3.8	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	-1.27	29.0	0.41	10.57	56.4	0.77
2	1.1	1.8	1.1	0.3	1.0	1.3	0.2	1.2	1.2	1.1	1.2	1.2	-0.55	24.0	1.67	10.87	45.7	0.34
3	0.5	1.6	1.6	1.0	0.5	0.8	0.1	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1	-1.05	29.6	0.42	10.87	38.8	0.91
4	1.6	1.8	5.4	1.6	0.7	0.8	1.2	1.1	1.2	1.2	1.3	1.2	-2.21	31.0	0.24	8.45	6.6	1.06
5	6.6	2.2	0.9	0.7	0.2	0.1	0.1	1.2	1.1	1.0	-1.9	-1.9	-0.02	17.9	0.58	8.45	11.4	1.36
6	1.3	1.8	1.1	3.4	1.5	0.7	0.1	1.2	1.2	1.3	1.2	-1.9	-0.90	22.5	2.58	14.47	26.7	0.24
7	6.1	2.2	2.5	0.9	0.3	0.6	0.4	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	-0.42	22.2	0.41	11.32	87.6	1.74
8	2.9	2.0	3.3	2.6	2.5	1.7	1.9	1.4	1.4	1.4	1.5	1.4	-1.29	30.4	0.33	11.32	87.6	1.87
9	13.4	2.4	2.2	2.5	2.5	1.7	1.2	1.8	1.5	1.4	1.4	1.4	-0.88	22.4	0.62	11.32	87.6	3.29
10	4.1	2.1	2.2	1.6	1.4	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.3	-1.16	23.0	0.51	11.32	105.5	1.33
11	2.8	2.0	0.4	-0.1	0.7	1.5	0.1	1.2	1.1	1.2	1.2	-2.0	-0.65	23.0	0.19	10.14	298.9	2.29
12	4.8	2.1	1.2	0.2	0.6	2.0	2.4	1.3	1.2	1.4	1.3	1.4	-1.05	23.5	0.36	10.14	342.5	3.34
13	13.7	2.4	2.4	2.5	2.6	1.4	1.9	2.4	1.9	1.7	1.8	1.5	-0.93	26.2	0.38	8.26	47.1	2.48
14	9.9	2.3	3.2	1.9	1.2	1.8	2.3	2.2	2.2	2.2	2.0	1.9	-0.80	23.7	0.17	8.26	234.8	1.93
15	4.8	2.1	1.1	0.1	0.2	0.2	0.7	1.2	-1.9	1.1	1.2	1.2	-0.99	29.7	0.67	8.40	1118.3	2.37
16	3.0	2.0	2.8	2.3	1.6	0.9	0.1	2.1	1.9	1.8	1.8	-2.4	-1.51	40.3	0.30	8.40	650.0	0.87
17	2.6	2.0	2.1	2.1	1.1	0.6	0.1	1.4	1.3	1.3	1.3	-2.0	-0.83	24.1	0.31	8.40	698.5	2.09
18	0.6	1.6	1.8	0.8	0.1	0.7	0.7	1.2	1.1	-1.9	1.2	1.2	-2.31	31.1	0.59	8.40	336.6	2.60
19	2.6	2.0	0.8	1.7	2.4	2.1	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	1.4	-1.00	28.9	0.28	8.40	480.8	3.72
20	0.5	1.5	0.1	0.1	0.2	0.5	0.4	-1.9	-1.9	1.1	1.2	1.1	-1.10	28.5	0.33	8.40	138.4	2.49
21	2.9	2.0	1.6	2.2	2.7	2.6	2.9	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	-0.93	28.5	0.78	6.19	438.8	0.43
22	4.4	2.1	0.8	0.3	0.1	0.5	0.4	1.2	1.1	-2.0	1.2	1.3	-1.51	38.2	0.24	6.19	261.3	2.60
23	1.6	1.8	3.7	2.4	1.7	1.9	1.0	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	-1.03	31.3	0.44	8.13	195.3	0.44
24	17.6	2.4	3.5	2.4	2.2	2.4	4.0	1.4	1.5	1.5	1.4	1.2	1.03	10.1	0.67	7.40	1887.8	1.10
25	0.3	1.5	3.8	2.4	0.1	0.8	1.6	1.4	1.3	-4.0	1.2	1.2	-0.79	27.4	0.33	7.35	68.9	0.62
26	1.0	1.7	4.7	3.4	2.0	0.7	0.4	1.3	1.3	1.2	1.1	1.0	-1.54	42.6	0.52	7.14	59.7	0.21
27	2.6	2.0	3.4	2.7	1.4	0.7	0.7	1.4	1.2	1.1	1.1	1.0	0.57	13.1	0.49	8.15	3.3	0.35
28	0.7	1.7	4.9	3.7	1.3	0.8	0.1	1.5	1.4	1.3	1.3	-1.6	-1.04	31.6	0.31	8.33	42.8	0.23

剥離度の係数は $a_2$ 、 $b_2$ のみ表示している。 $a_1$ 、 $b_1$ 、 $A$ は全橋において $a_1=0$ 、 $b_1=0$ 、 $A=10$ としている。

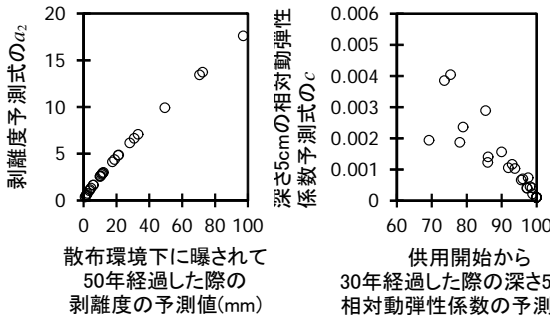


図-14 剥離度と予測式の係数 $a_2$ の関係および相対動弾性係数と予測式の係数 $c$ の関係

$D_{CI}$ を、部材が受ける環境を直接的に表す、凍結防止剤を含む融雪水の供給実態すなわち塩化物イオン蓄積量 $C_{CI}$ (kg/m<sup>3</sup>)に置き換えた式(15)による回帰分析も行った。 $c$ は図-7に鑑みて塩化物の影響は考慮せず、材料因子として圧縮強度 $F$ (MPa)、気泡間隔係数 $L$ (mm)、環境因子として地域係数 $T$ に着目した式(16)を設定し、深さ毎に関係を調べた。

$$a_2 = p_1 \cdot \omega + q_1 \cdot T + q_2 \cdot D_{CI} + r \quad (14)$$

$$a_2 = p_1 \cdot \omega + q_1 \cdot T + q_3 \cdot C_{CI} + r \quad (15)$$

$$c = p_2 \cdot F + p_3 \cdot L + q_1 \cdot T + r \quad (16)$$

ここに、 $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ は材料因子の重み係数、 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$

表-5 回帰分析の結果

式	深さ	材料因子の重み係数			環境因子の重み係数			係数
		$p_1$	$p_2$	$p_3$	$q_1$	$q_2$	$q_3$	
(14)	—	2.26	—	—	0.18	0.004	—	3.85
(15)	—	3.48	—	—	-0.07	—	1.64	5.73
(16)	1cm	—	$2 \times 10^5$	$-6 \times 10^4$	$-2 \times 10^5$	—	—	$2 \times 10^3$
	2cm	—	$2 \times 10^5$	$3 \times 10^5$	$-2 \times 10^5$	—	—	$1 \times 10^3$
	3cm	—	$-3 \times 10^6$	$2 \times 10^4$	$-3 \times 10^5$	—	—	$1 \times 10^3$
	4cm	—	$-2 \times 10^5$	$-8 \times 10^5$	$-4 \times 10^5$	—	—	$2 \times 10^3$
	5cm	—	$-6 \times 10^5$	$-3 \times 10^4$	$-1 \times 10^4$	—	—	$4 \times 10^3$

ただし、各影響因子の領域は下記の通り

材料因子： $-2.31 \leq \omega \leq 1.03$ 、 $10.1 \leq F \leq 42.6$ 、 $0.17 \leq L \leq 2.58$ 、

環境因子： $6.19 \leq T \leq 14.47$ 、 $3.3 \leq D_{CI} \leq 1887.8$ 、 $0.21 \leq C_{CI} \leq 3.72$

は環境因子の重み係数、 $r$ は係数である。なお、 $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ 、 $q_1$ 、 $q_2$ 、 $q_3$ 、 $r$ の値は式によって異なる。

表-5に回帰分析の結果を示す。スケーリングは理論的に $\omega$ 、 $T$ 、 $D_{CI}$ および $C_{CI}$ が大きいほど促進されるため、重み係数はすべて正となる。式(14)はこれと対応したが、式(15)は $q_1$ が負、 $p_1$ と $q_3$ は式(14)よりも値が大きくなる特徴的な傾向を示し、 $T=6.19 \sim 14.47$ の環境では、剥離度は $\omega$ と $C_{CI}$ に特に強く支配される結果を得た。しかし、直線近似と仮定した式(14)と式(15)による $a_2$ の計算値と実際の $a_2$ は、図-15に示すようにばらつきが大きい。今後さらに積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の耐久性性能の評価法精度を向上するためには、今後は $a_2$ と材料・環境因子との相関性を詳細に調べる必要がある。

相対動弾性係数は理論的に圧縮強度が小さく、気泡間隔係数と地域係数が大きいほど低下しやすくなるため、

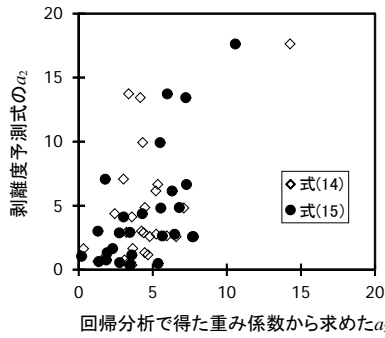


図-15 式(14)、(15)による  $a_2$  と実際の  $a_2$  との関係

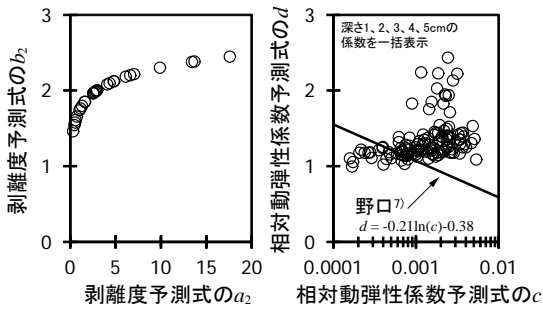


図-16 係数  $a_2$  と  $b_2$ 、係数  $c$  と  $d$  の関係

重み係数は  $p_2$  が負、 $p_3$  と  $q_1$  は正となる。しかし、分析結果はこれと対応しなかった。また、重み係数の絶対値も剥離度に比べると小さかった。これは橋台の相対動弾性係数は、例えば夏期に作用する乾燥・乾湿<sup>19)</sup>など、今回の調査で考慮しなかった別な因子が大きく影響していると類推される。橋台の相対動弾性係数の進行を評価するには、このような因子についてもさらに考慮する必要があると言える。

次に、係数  $b_2$ 、 $d$  について考察する。既往研究<sup>7)</sup>では係数  $c$  と  $d$  の関係を検討し、図-16 に併記した式を示している。これに鑑みて  $c$  と  $d$  の関係、またこれを参考に  $a_2$  と  $b_2$  の関係を検討した。図-16 に示すように  $a_2$  と  $b_2$  は良く対応し、 $a_2$  から  $b_2$  を決定できる傾向が示された。 $c$  と  $d$  はばらつきがみられるものの、多くのデータは野口の式の近傍にプロットされた。

#### 4. 塩化物イオンの浸透性への影響の評価（複合劣化実験②）および評価法の体系化

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ての一環として、ASTM C 672 に準じた条件下で塩水による凍結融解試験と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。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法の体系化について考察した。

#### 4. 1 体系化の考え方

2章で述べたように、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、式(3)、(4)が示されている（建設当初から凍結防止剤の作用を受ける状況を想定）。

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(17)<sup>2), 20)</sup>が使用されている。

$$C(x, t) = C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (17)$$

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 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $C_0$  はコンクリート表面の塩化物イオン量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $\operatorname{erf}$  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 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ ) 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。この場合、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、Fickの拡散方程式を解くことになるため計算は複雑になる。そこで、既報<sup>21)</sup>で式(18)に示すFickの拡散方程式の差分<sup>22)</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。

$$\begin{cases} C_{m,n+1} = D_{m,n} r (C_{m+1,n} + C_{m-1,n}) + C_{m,n} (1 - 2D_{m,n} r) \\ r = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (\text{ただし } r \leq \frac{1}{2}) \end{cases} \quad (18)$$

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 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $r$  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 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ ) である。

また、既報<sup>21)</sup>では、変化の割合を  $g$  とした式(19)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もあわせて示した。

$$D_{m,n} = g \cdot \text{cyc} + D \quad (19)$$

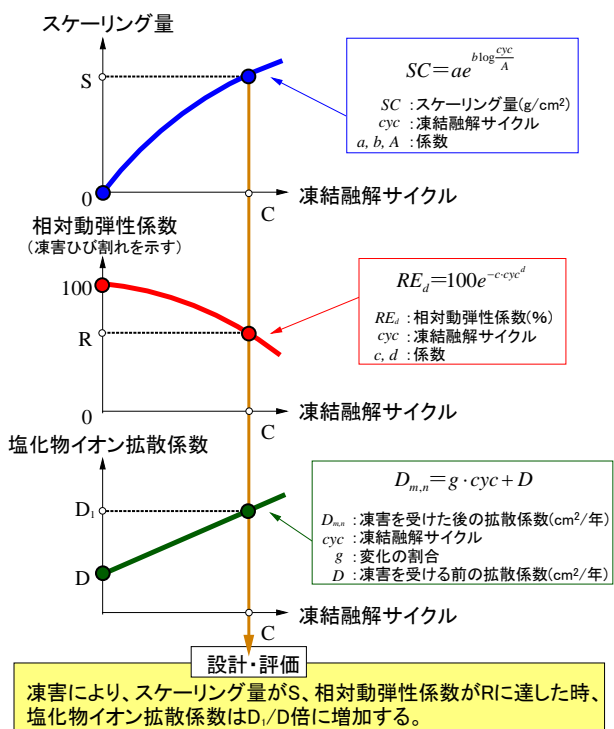


図-17 凍害の発生状況から塩化物イオン拡散係数の経時変化を決定する流れの基本概念

式(3)、(4)、(19)を連立させることで、図-17に示すように、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-18のイメージ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(3)をcycについて解くと式(20)が得られ、式(20)を式(4)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。

$$cyc = A \cdot 10^{\frac{\ln \frac{SC}{a}}{b}} \quad (20)$$

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(19)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。

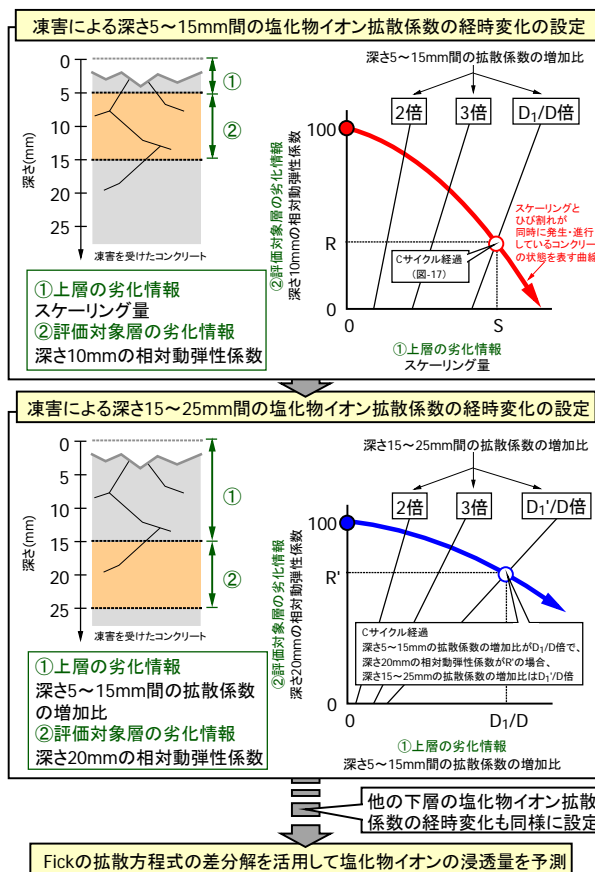


図-18 本研究で目指す体系化のイメージ

表-6 コンクリートの配合

記号	セメント	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
			W	C	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

- ・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
- ・目標空気量は4.5±1.5%

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(18)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。

ここでは図-18に示す設計・評価法の体系化をめざし、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

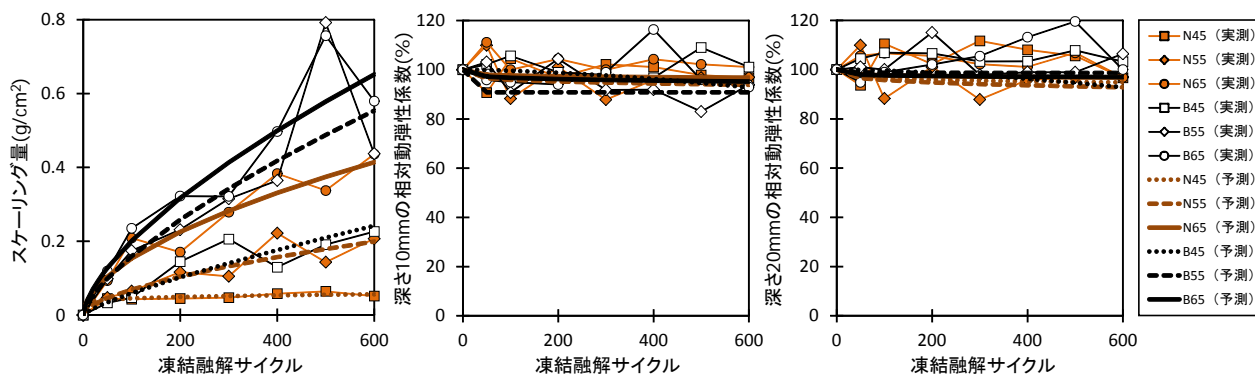


図-19 凍結融解試験結果（スケーリング量、深さ 10mm および 20mm における相対動弾性係数）

係について調べた。

## 4. 2 実験概要

### 4. 2. 1 コンクリートの配合・材料・供試体

表-6 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および高炉セメント B 種の 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、粗骨材は 2 章の実験と同じものを用いた。粗骨材の最大寸法は 25mm とした。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  $4.5 \pm 1.5\%$  に設定した。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。供試体の寸法、作製手順は 2 章に同じである (図-1)。

### 4. 2. 2 実験内容

一面凍結融解試験は ASTM C 672 を準用した。濃度 3% の塩化ナトリウム水溶液 (以下、塩水と記す) を深さ 6mm 張り、 $-18^{\circ}\text{C}$  16 時間、 $23^{\circ}\text{C}$  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。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。スケーリング量と相対動弾性係数の測定要領は 2 章に同じである。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. 3 実験結果・考察

### 4. 3. 1 凍結融解試験

図-19 に凍結融解試験の結果を示す。式(3)、(4)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]  $\times$  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>10)</sup>と同様に、高炉セメント 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. 3. 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-20 に示す。比較のために実施した、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。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、塩化物イオン拡散係数は常時一定と仮定して式(17)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-21 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>2)</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  $W/C=30\sim55\%$  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>2)</sup>に記載されていることに鑑み、一般的な  $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ <sup>22)</sup> とした。予測が  $1.2\text{kg}/\text{m}^3$  未満でも実測値が  $1.2\text{kg}/\text{m}^3$  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(18)による予測を行い、凍結

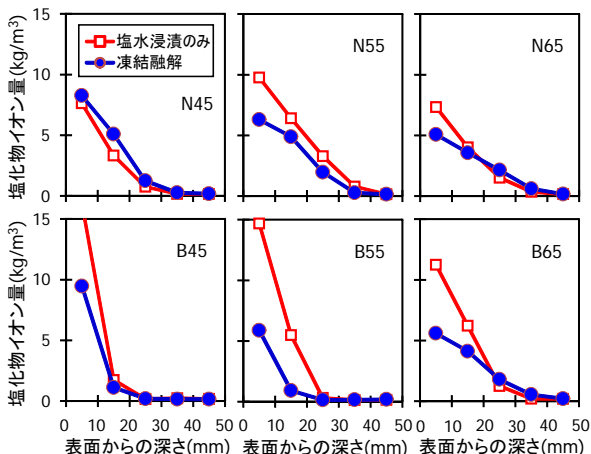


図-20 塩化物イオン量の測定結果 (300サイクル)

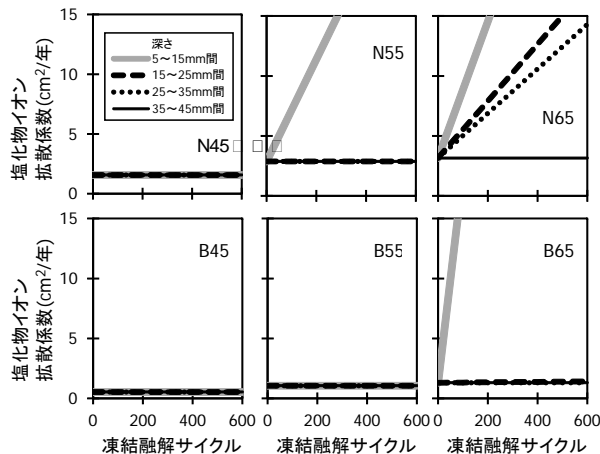


図-22 塩化物イオン拡散係数の経時変化

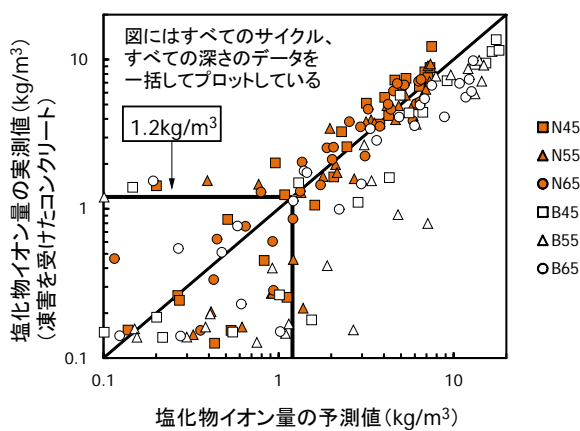


図-21 塩化物イオン量の予測値と実測値の比較 (予測値は凍害の影響を考慮していない値)

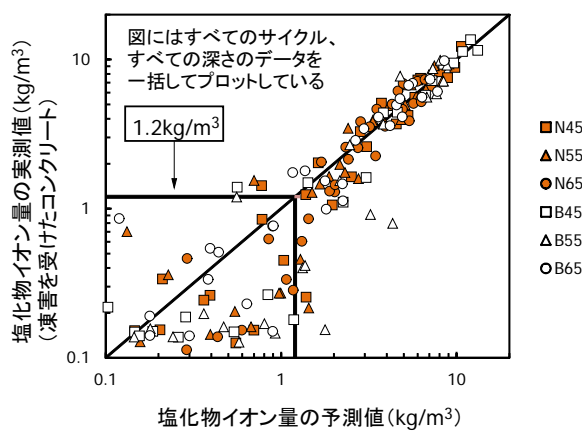


図-23 塩化物イオン量の予測値と実測値の比較 (予測値は凍害の影響を考慮した値)

融解を与えた場合の実測値との比較を行った。図-22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-23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(19)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 $1.2\text{kg/m}^3$ 未満の範囲に着目すると、実測値が $1.2\text{kg/m}^3$ を上回っているプロット数は図-21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 $R^2$ を調べたところ、図-21は0.80、図-23は0.93でばらつきの改善が確認された。なお、図-23は図-21に比べ、実測値が $0.2\text{kg/m}^3$ 以下の範囲に予測値が広範囲に多くプロットされている。本研究では試験開始直後から塩化物イオン拡散係数は直線的に増加すると仮定して塩化物イオン量の予測を行っているが、今回行った実験では、試験開始から間もない初期段階においては凍害の程度が比較的小さかったために予測値が実測値よりも大きく表示された可能性が考えられる。なお、このことは、

実際の塩化物イオン量の浸透を予測式が安全に評価したことを示しており、式(18)、式(19)による評価は有効と考えられる。

#### 4.4 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

4.1で述べた内容に沿って、図-19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-22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-18)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-24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△のマークでプロットした。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



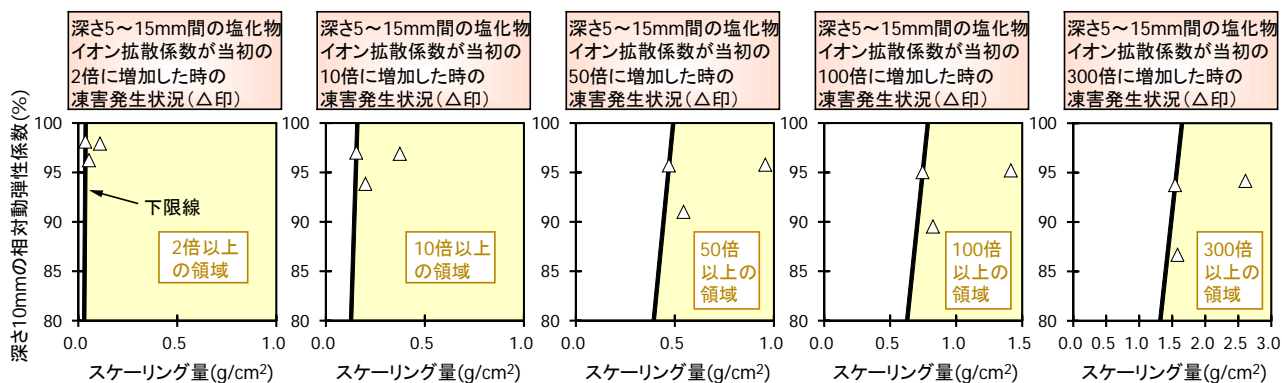


図-24 深さ5～15mm間の塩化物イオン拡散係数が当初の2、10、50、100、300倍に増加した時のスケーリング量（上層の劣化情報）と深さ10mmの相対動弾性係数（評価対象層の劣化情報）

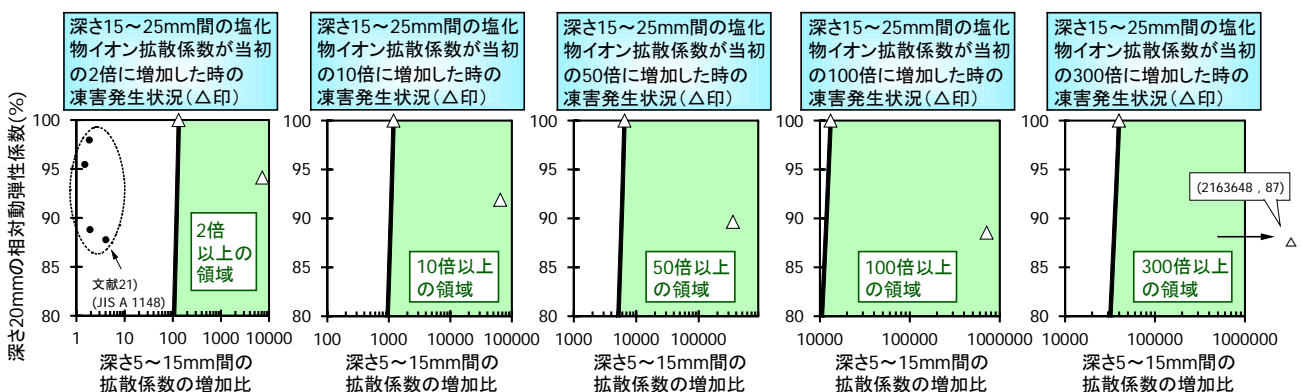


図-25 深さ15～25mm間の塩化物イオン拡散係数が当初の2、10、50、100、300倍に増加した時の深さ5～15mm間の拡散係数の増加比（上層の劣化情報）と深さ20mmの相対動弾性係数（評価対象層の劣化情報）

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>24), 25)</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-24の左端）では、既にプロットした3点に $(x, y)=(SC, \text{深さ} 10\text{mmの} RE_d)=(0, 0)$ 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-25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△のマークでプロットした。ここでも安全側の設計法を提案す

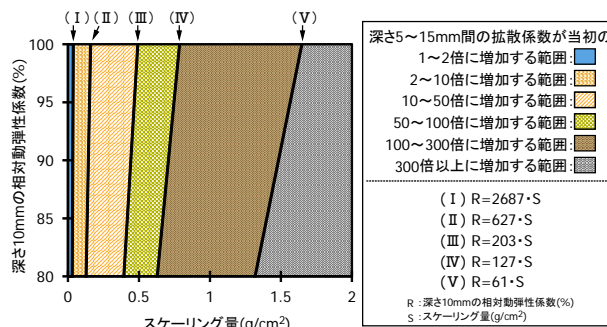


図-26 凍害を考慮した深さ5～15mm間の塩化物イオン拡散係数の表示方法の整理

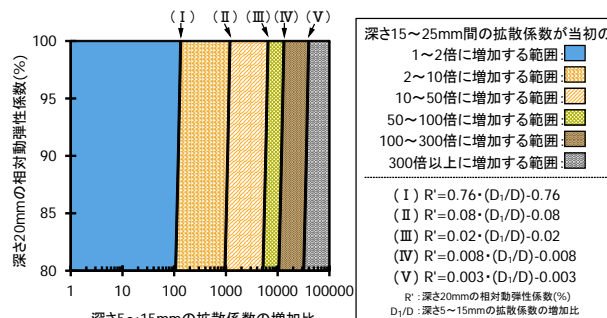


図-27 凍害を考慮した深さ15～25mm間の塩化物イオン拡散係数の表示方法の整理

る観点から、既にプロットした2点が収まるよう、 $(x, y) = (\text{深さ}5\sim15\text{mm間の拡散係数の増加比}, \text{深さ}20\text{mmの}RE_d) = (1, 0)$ 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-24、25を重ね合わせると、図-18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-26、27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-22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-24、25に示さなかったが、図-19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、凍害の程度がN55よりも大きいことが前提条件となる。このことから、図-26、27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-25の一番左)に、過年度に文献21)で報告したASTM C 672に比べて含水状態や温度勾配などの条件が厳しいJIS A 1148のA法(急速水中凍結水中融解試験)に準じた実験のデータを●のマーカでプロットした(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。

ここでは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>19)</sup>を受ける場合など)に応じて図-26、27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。

### 5. 実構造物調査のデータ解析による塩化物イオンの浸透に関する評価式の開発

4章で述べたように、凍害(スケーリング、ひび割れ)の進展が塩害を促進させることが実験的に示されたものの、実環境での検証事例は少ない。そこで、実環境での傾向を把握するため、3章で調査を行った道路橋下部の一部を対象に、路面から流下する凍結防止剤を含む融雪

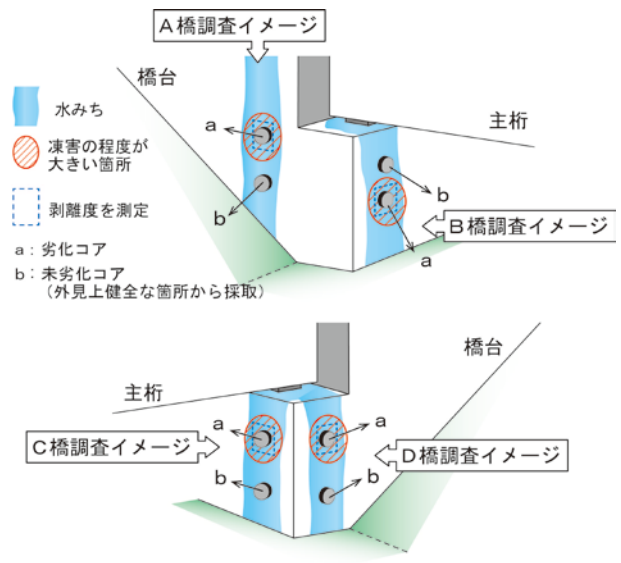


図-28 調査の概念図

表-7 調査橋梁の諸元、剥離度、中性化深さ

橋名	A橋	B橋	C橋	D橋	
橋長 (m)	110	214	230	135	
架設年度	1968	1996	1986	1984	
累積Cl散布量 (kg/m)	1268	743	545	106	
剥離度 (mm)	7.33	5.26	2.00	48.5	
中性化深さ (mm)	未劣化コア	9.6	1.0	0.9	10.5
	劣化コア	12.0	2.0	0.5	10.0

・累積Cl散布量は、供用後、これまでに路面に散布された橋長1mあたりの塩化物イオン量。算出方法は3章の図-11による。  
 ・剥離度は凍害の程度が大きい箇所の値

水の水みち上に存在する凍害の程度が大きい箇所と外見上、健全で凍害の程度が極めて小さい箇所の塩化物イオン量の比較を行った。

#### 5.1 調査概要

図-28に調査の概念図を示す。調査は、北海道内の山間部に位置するA、B、C、Dの4橋で行った。調査橋梁の諸元を表-7に示す。両橋とも冬期は凍結防止剤が散布されている。調査部位は橋台とし、路面から橋台壁面を流下する同じ凍結防止剤を含む融雪水の影響を受ける水みち範囲に存在する凍害の程度が大きい箇所と外見上、健全な箇所を調査位置に選定した。

はじめに、凍害の程度が大きい箇所において、橋台壁面に50×50cmの枠を設置し、枠内における剥離面積と平均剥離深さを測定し、式(7)により剥離度を求めた。

次に、凍害の程度が大きい箇所と外見上、健全な箇所からφ10×10cmのコアを採取し(以降、前者を劣化コア、後者を未劣化コアと記す)、深さ1~5cmの相対動弾性係数を測定した。相対動弾性係数の測定要領は3章に同じである。次に、コンクリートカッターを使用して、剥離面から深さ5cmまでの範囲と深さ9~10cmの部分を

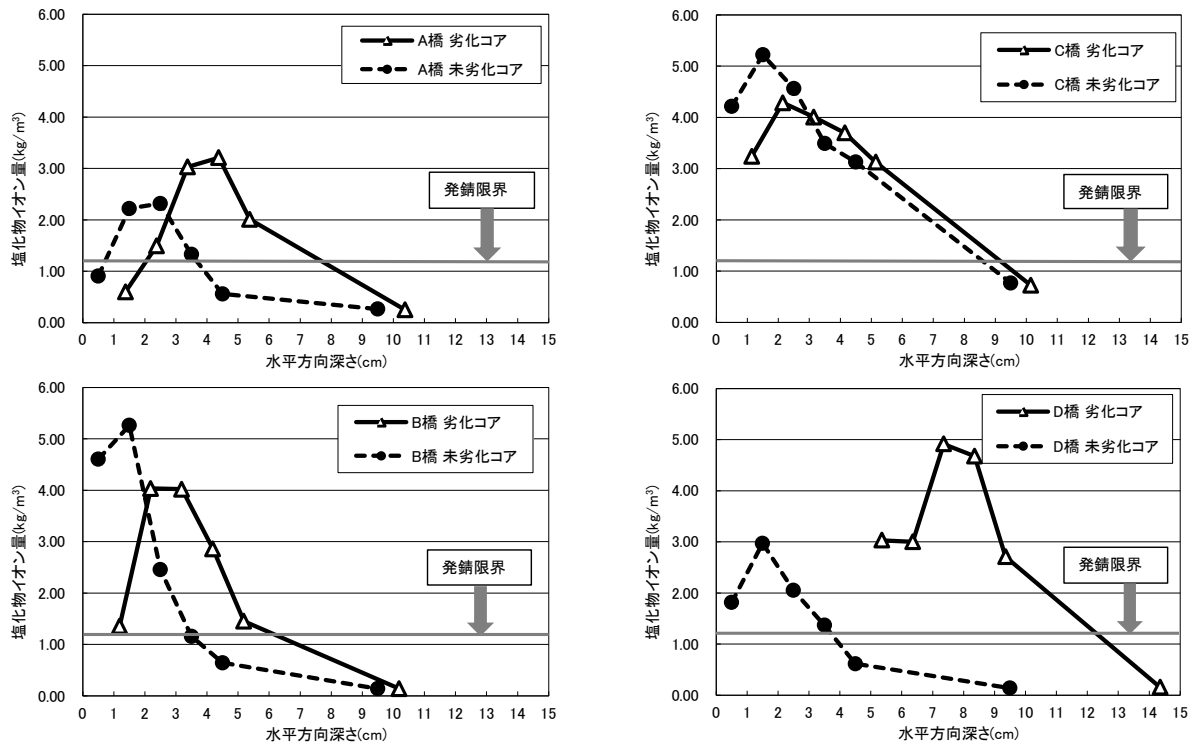


図-29 水平方向深さと塩化物イオン量の関係

1cm 間隔にスライスして、JIS A 1154 (硝酸銀滴定法) に準じて各スライス片に含まれる塩化物イオン量を測定した。また、採取したコアに 1% フェノールフタレイン溶液を噴霧し、その発色反応から中性化深さを測定した。剥離度および中性化深さは表-7 に示す通りであった。

## 5.2 調査結果・考察

### 5.2.1 塩化物イオン量

図-29 に各橋の水平方向深さにおける塩化物イオン量の分布を示す。この図では、例えば建設当初の面から深さ 0~1cm 間の塩化物イオン量であれば、その中間の深さ 0.5cm 位置にデータをプロットしている。剥離度が 10mm 未満の A、B、C 橋の劣化コアをみると、A 橋は建設当初の面から深さ 3~6cm、B 橋は深さ 2~5cm、C 橋は深さ 2~5cm の範囲で塩化物イオン量が未劣化コアよりも大きい特徴的な傾向がみられた。剥離度が前者よりも大きい約 50mm の D 橋は、剥離面から深さ 1cm の位置で既に未劣化コアよりも大きな塩化物イオン量を示し、さらに建設当初の面から深さ 9cm でもより大きな値を示した。道路橋示方書<sup>26)</sup>では、内陸の山間部は塩害に対して通常の区分で基本的に「影響なし」もしくは「対策区分Ⅲ」のエリアに分類される。今回調査した道路橋は内陸の山間部に位置し、これに相当する設計かぶりは前者で 4cm、後者で 5cm と記されている。また、4 章に同じく鋼材腐食発錆限界濃度を  $1.2\text{kg/m}^3$  (図中には発錆限界

と記す) と仮定すると、今回調査した 4 橋の劣化コアは建設当初の面から深さ 5cm 程度付近においても発錆限界値を超え、特に A、B、D 橋では未劣化コアとの塩化物イオン浸透量の差異が明確に示された。凍結防止剤を含む融雪水の供給を受けやすい部位では、剥離度が数ミリ程度でも塩害の進展が懸念されることがわかった。

### 5.2.2 塩化物イオン濃度分布に及ぼす中性化の影響

表-7 で示したように、A、D 橋は剥離面から深さ約 10mm 前後までの範囲で中性化が認められる。このことから、A、D 橋の塩化物イオン濃度分布は、凍害に加えて中性化による移動濃縮<sup>27)</sup>の影響も受けていると考えられる。一方、B、C 橋の中性化深さは剥離面から深さ約 1mm 程度で、A、D 橋に比べると極めて小さかった。B、C 橋は図-29 に示すように、剥離面から最も浅い部分のプロットを除くと、深くなるにつれて塩化物イオン量は小さくなる傾向が概ね示されている。B、C 橋で得られた未劣化コアよりも劣化コアの塩化物イオン量が多かった結果は、主として凍害の影響によってもたらされたものと考えられる。

### 5.2.3 塩化物イオン濃度分布に及ぼす相対動弾性係数の影響

図-30 に各橋の水平方向深さにおける相対動弾性係数の分布を示す。ここでは図-29 と同様に、例えば建設当初の面から深さ 0~1cm 間の相対動弾性係数であれば、

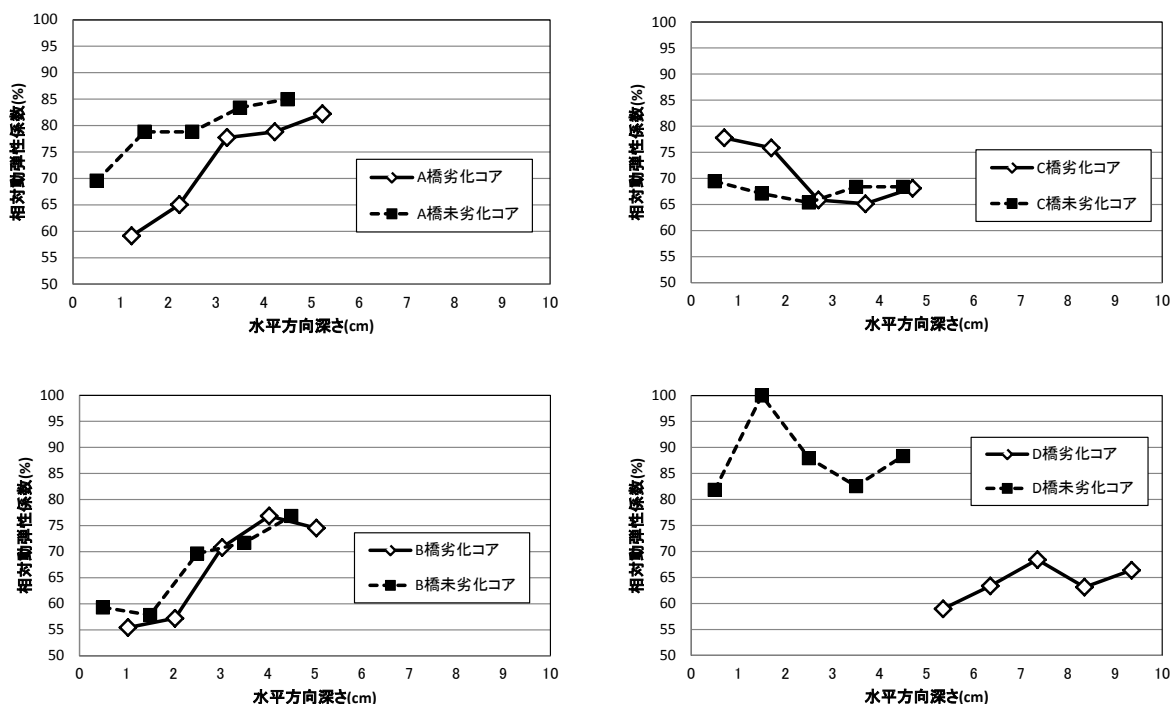


図-30 水平方向深さと相対動弾性係数の関係

その中間の深さ 0.5cm 位置にデータをプロットしている。A、B、D 橋では、全体的に劣化コアの方が未劣化コアよりも相対動弾性係数が小さい結果が示され、図-29 で示した塩化物イオン濃度分布と良く対応する傾向が示された。一方、C 橋の劣化コアにおける相対動弾性係数は、表面から2cm付近まで未劣化コアより大きな値を示した。さらに、他の橋とは対照的に、深くなるにつれて相対動弾性係数が減少する結果が得られ、塩化物イオン量との対応は明瞭に示されなかった。既往の研究<sup>28)</sup>では、微細ひび割れ内部が水分で飽和されている場合、空隙である微細ひび割れを迂回して遅く伝播するはずの超音波が、微細ひび割れ内の水分を経路として早く伝播するため、超音波伝播速度は速くなることが確認されている。劣化コアの深さ2cmまでの相対動弾性係数が大きかった要因の一つに、劣化コア表層の微細ひび割れ内に水分が多く存在し、これに起因して超音波伝播速度が速く計測されたことが考えられる。

以上のことから、4章で述べた凍害（スケーリング、ひび割れ）の進展が塩害を促進させる傾向は、実環境でも確認された。凍結防止剤を含んだ融雪水等が通る水みちでは時間の経過とともにスケーリングがさらに促進される可能性がある。このため、塩化物イオンがより内部へ浸透しやすくなることが懸念され、凍害の進行を把握し、適切な時期に補修・対策工を実施するなど、凍害の

進行を考慮した戦略的な維持管理を行うことが大切といえる。なお、次年度は、今回得た調査データと4章の図-18、26、27で示した評価法との整合について検証を進めていく予定である。

## 6. まとめ

平成26年度は凍害の進行予測式および塩化物イオン浸透に関する評価式の開発に向けて、下記の5項目に関する種々の実験・調査を行った。

- ・スケーリング・ひび割れが複合化した凍害の進行性の評価（複合劣化実験①）
- ・塩化物イオンの浸透性への影響の評価（複合劣化実験②）
- ・実構造物における凍害の進行性および塩化物イオンの浸透性の評価（構造物調査）
- ・現地データ解析による、実験式の補正に基づく、凍害の進行予測式および塩化物イオンの浸透に関する評価式の開発
- ・評価法の体系化および評価フローの検討

本年度の研究で得た知見をまとめると、以下のようになる。

### 6.1 スケーリング・ひび割れが複合化した凍害の進行性の評価（複合劣化実験①）

- (1) スケーリングの予測は、既往の凍害予測式に組み込

まれている時間の変数を環境条件の変遷に応じて変化させる必要がある。

- (2) 今回の条件下では、相対動弾性係数は基本的に時間を区分せず、概ね同一の式で予測が可能である結果が示された。
- (3) 環境の変遷を考慮した凍害進行予測モデルを示した。

## 6.2 実構造物調査のデータ解析による凍害の進行予測式の開発

- (1) スケーリングの進行予測式の係数は、ばらつきはあるが、材料因子であるスケーリングの進行速度を表す指標値 $\omega$ 、環境因子である地域係数、凍結防止剤散布量もしくはコンクリート中の塩化物イオン蓄積量と概ね比例関係にあった。
- (2) 相対動弾性係数の進行予測式の係数と、圧縮強度、気泡間隔係数、地域係数との相関は小さかった。予測式の係数を設定するには、これら以外の因子についても考慮する必要がある。

## 6.3 塩化物イオンの浸透性への影響の評価（複合劣化実験②）および評価法の体系化

- (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。

## 6.4 実構造物調査のデータ解析による塩化物イオンの浸透に関する評価式の開発

- (1) 凍害（スケーリング、ひび割れ）の進展が塩害を促進させる傾向は、実環境でも確認された。
- (2) 凍害によって、塩化物イオンがより深い構造物内部へも浸透しやすくなることが懸念され、凍害の進行を把握し、適切な時期に補修・対策工を実施するなど、凍害を考慮した戦略的な維持管理を行うことが大切といえる。

## 7. 今後の課題

平成27年度は、塩水を用いた凍結融解試験ならびに道路橋下部での調査を継続し、取得したデータを整理してスケーリング・ひび割れが複合化した場合の凍害の進行予測式、塩化物イオンの浸透評価式、凍害の各種劣化形態を複合的に受けたコンクリートの性能評価式を提案するとともに、「凍害診断の手引き」への研究成果の反映を図る予定である。

### 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.123, 2008.3
- 2) 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
- 3) 日本コンクリート工学協会:コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書, pp.21-22, 2008.8
- 4) 例えば) 2013年制定コンクリート標準示方書「規準編」, JIS規格集, pp.597-601, 土木学会, 2013.11
- 5) 緒方英彦, 服部九二雄, 高田龍一, 野中資博:超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1563-1568, 2002.6
- 6) 遠藤裕丈, 田口史雄, 林田宏, 名和豊春:簡易で実用的なスケーリング進行予測式の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.923-928, 2011.7
- 7) 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, pp.32-124, 2007.9
- 8) Stark, J. and Wicht, B. (訳者:太田利隆, 佐伯昇): Dauerhaftigkeit Von Beton, p.202, セメント協会, 1999.
- 9) 竹田宣典, 十河茂幸:凍害と塩害の複合劣化作用がコンクリートの耐久性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.427-432, 2001.
- 10) 遠藤裕丈, 田口史雄, 嶋田久俊:塩化物水溶液による長期凍結融解作用を受けたコンクリートのスケーリング特性, 土木学会論文集, No.725/V-58, pp.227-244, 2003.2
- 11) 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, 2000.3
- 12) 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, p.131, 2011.3
- 13) 山下英俊:コンクリート構造物の凍害の劣化評価と予測に関する研究, 北海道大学博士学位論文, pp.122-125, 1999.3
- 14) 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, XXIX, pp.248-253, 1975.
- 15) 日本コンクリート工学協会:コンクリート技術の要点'99, pp.56-57, 1999.
- 16) 濱幸雄, 松村光太郎, 田畑雅幸, 富板崇, 鎌田英治:気象因子を考慮したコンクリートの凍害劣化予測, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp.9-16, 1999.9
- 17) 文献15), p.155
- 18) 桂修:過冷却現象を考慮したコンクリートの凍害機構に関する研究, 北海道大学博士学位論文, p.91, 1999.9



#### 15.4 凍害の各種劣化形態が複合したコンクリート構造物の性能評価法の開発

- 19) 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
- 20) 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
- 21) 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
- 22) 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
- 23) 日本コンクリート工学協会: コンクリート診断技術02「基礎編」, p.194, 2002.1
- 24) 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
- 25) 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」
- 26) 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, p.169, p177, 2002.3
- 27) 文献23), pp.34-36
- 28) 林田宏, 田口史雄, 遠藤裕丈, 草間祥吾: 超音波伝播速度測定によるコンクリート構造物の凍害診断に関する基礎的研究, 寒地土木研究所月報, No.656, pp.10-15, 2008.1

## DEVELOPMENT OF A PERFORMANCE EVALUATION METHOD FOR CONCRETE STRUCTURES SUBJECTED TO A COMBINATION OF VARIOUS FORMS OF DETERIORATION CAUSED BY FROST DAMAGE

**Budgeted** : Grants for operating expenses

General account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Cold-Region Maintenance Engineering Research Group  
(Materials Research Team)

Cold-Region Technology Development Coordination

(Cold-Region Technology Promotion Division)

**Author** : SHIMATA Akinori, MIHARA Norihiro, ENDOH Hirotake,  
SEINO Masaki, YAMADA Shohji, KAWAMURA Kohji,  
YOKOYAMA Hiroyuki, TAKADAMA Namio, ICHIKAWA Seiichi,  
HUIJITA Yuuji, TAKADA Naoto, OOTA Hideharu, WATANABE Jun  
and SUZUKI Satoshi

**Abstract** : In cold regions, concrete structure is simultaneously affected by scaling and crack due to frost damage, and chloride-ion supply; thus, concrete performance evaluation method that influence of the frost damage was considered is demanded. In fiscal year 2014, toward formulating suggestions for methods of evaluating concrete performance when frost damage is in two or more forms, as a study on frost damage prediction, experiment about frost damage prediction considering change of environmental conditions, and analytical evaluation for influence of materials and environmental factor on frost damage progress of actual structures were done. Furthermore, as a study on influence of chloride ion penetration on frost damage, study on the system of durability design and evaluation method for control of salt damage considering frost damage, and investigation about chloride ion penetration of highway bridge abutment in cold regions were done.

**Key words** : Freeze-Thaw, Scaling, Cracking, Chloride Ion, Performance Evaluation