

# 論文 寒冷環境下での塩化物イオン浸透予測に関する暴露実験

遠藤 裕丈\*1・島多 昭典\*2

**要旨:** コンクリート構造物の耐久性を適切に評価できる劣化予測手法の整備が課題となっている。コンクリートが凍結融解と塩化物の複合作用を受けると凍害と同時に塩化物イオンの浸透が促進されるため、鉄筋の早期腐食が懸念される。著者らは凍害によって塩化物イオンの見かけの拡散係数が経時的に変化する際の塩化物イオン浸透予測は、Fick の拡散方程式の差分法を活用することで比較的簡易に行えることをこれまでの室内実験で明らかにした。この知見の妥当性を実環境で検証するため、寒冷地沿岸部で暴露実験を3年間行った。暴露実験でも差分法により凍害を考慮した塩化物イオン浸透予測が合理的に行えることを確認した。

**キーワード:** 寒冷地, 暴露実験, 塩化物イオン拡散係数, 差分法

## 1. はじめに

コンクリート構造物の維持管理を合理的に行うには、実態に即した劣化予測を実施し、適切な修繕計画を立てることが大切である。このため、正確な劣化予測手法が必要となる。例えば現在、塩化物イオンの浸透予測は、コンクリート表面の塩化物イオン量と、塩化物イオンの見かけの拡散係数（以下、拡散係数と記す）を常時一定とした Fick の拡散方程式の解により行われている<sup>1)</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 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $D$  は拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )、 $C_0$  はコンクリート表面の塩化物イオン量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $\operatorname{erf}$  は誤差関数である。

一方、寒冷地のコンクリート構造物は凍結融解と塩化物の複合作用を受けやすい。このため、拡散係数の経時変化に及ぼす凍害の影響を適切に考慮した予測が求められる。著者らはこれまで実験室において塩水を用いた凍結融解試験を行い、Fick の拡散方程式の差分法<sup>2)</sup>を活用することで凍害の影響を考慮した塩化物イオンの浸透予測が比較的簡易に行えることを実験的に示した<sup>3)</sup>。

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

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  $x_{m-1} \sim x_m$  間の拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ ) である。

本研究では、寒冷地の実態に即した劣化予測方法の提

表-1 コンクリートの配合

配合記号	使用セメント	W/C (%)	単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )			
			W	C	S	G
NP45	普通ポルトランドセメント	45	144	320	815	1082
NP55		55	146	265	871	1065
NP65		65	148	228	922	1041
BB45	高炉セメント B 種	45	145	322	808	1073
BB55		55	147	267	865	1059
BB65		65	149	229	917	1035

目標空気量はいずれの配合も  $4.5 \pm 1.5\%$



図-1 増毛暴露実験場の位置

案に向け、室内実験<sup>3)</sup>で得たこの知見の妥当性を実環境で検証するため、寒冷地沿岸部で暴露実験を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 コンクリート配合・材料・供試体

表-1 に配合を示す。各配合にはセメントの種類と水セメント比を組合せた記号を付けた。細骨材は苫小牧錦岡産の海砂（除塩処理済み）、粗骨材は小樽見晴産の碎石を使用した。供試体は  $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 40\text{cm}$  の角柱とした。材齢 7 日まで湿布養生、材齢 28 日まで恒温恒湿室（温度  $20^\circ\text{C}$ 、湿度 60%）に静置した後、暴露実験に供した。

### 2.2 暴露実験

暴露実験は、北海道増毛町にある増毛暴露実験場で行った。図-1 に位置を示す。日本海に面し、年間を通じて塩分が飛来する環境にある。図-2 に暴露方法、写真

\*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-2 暴露方法

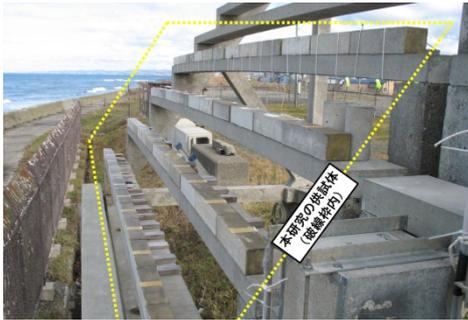


写真-1 暴露状況

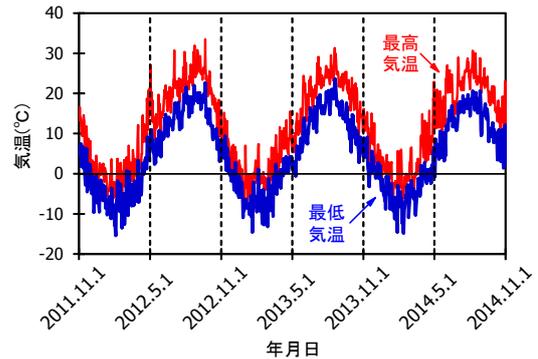


図-3 増毛の最高・最低気温の推移（実験期間中）<sup>4)</sup>

ー1 に暴露状況を示す。ここでは、飛来塩分の単独作用のみ与える「夏暴露」、凍結融解と飛来塩分の複合作用のみ与える「冬暴露」、そして、実構造物が供用される実際の環境である「通年暴露」の3種類の暴露実験を行った。暴露面は打設面とし、それ以外の5面は塩化物イオンの浸透を防ぐため、エポキシ樹脂でコーティングした。冬暴露と通年暴露は2011年11月、夏暴露は2012年5月より開始し、それぞれ3シーズン暴露した。図-3 は増毛の気温の推移である<sup>4)</sup>。暴露実験期間中の最高気温は33.5℃、最低気温は-15.4℃であった。最高気温がコンクリートの凍結温度である-2℃<sup>5)</sup>より高く、最低気温が-2℃以下の日を凍結融解1日、最高・最低気温とも-2℃以下の日を凍結持続1日として凍結融解日数と凍結持続日数を調べたところ、冬暴露、通年暴露とも暴露実験期間中の凍結融解日数は222日、凍結持続日数は104日であった。暴露を行わない期間(図-2の「屋内保管」)は、写真-2 に示すように、実験場内の試験管理棟(観測所兼倉庫として使用)に保管した。

### 2.3 実験項目

夏暴露は塩化物イオン量、冬・通年暴露は塩化物イオン量に加え、凍害(スケーリング・ひび割れ)の程度を調べるため剥離度と各深さの相対動弾性係数も測定した。

塩化物イオン量の測定は、架台から供試体を回収し、コンクリートカッターで深さ0~1, 1~2, 2~3, 3~4, 4~5cmに切り分けた後、JIS A 1154に準じて行った。

剥離度は「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>6)</sup>が提案する方法に準じ、暴露面の剥離面積と剥離深さをそれぞれ調べ、次式より求めた。



写真-2 屋内保管の状況（実験場内の試験管理棟）

$$D_m = D \times A_s \quad (3)$$

ここに、 $D_m$  は剥離度(mm)、 $D$  は平均剥離深さ(mm)、 $A_s$  は暴露面(10cm×40cm)に占める剥離面積の割合である。剥離深さは10点測定し、その平均を $D$ とした。全面スケールしている場合、剥離深さが剥離度となる。

相対動弾性係数は、深さ1, 2, …, 9cmの供試体側面に超音波(周波数28kHz)の発・受振子をあて、深さごとに超音波伝播速度を測定し、緒方ら<sup>7)</sup>の式から求めた。

$$E_d = 4.0387V^2 - 14.438V + 20.708 \quad (4)$$

$$RE_d = \frac{E_{dm}}{E_{d0}} \times 100 \quad (5)$$

ここに、 $E_d$  は動弾性係数(GPa)、 $V$  は超音波伝播速度(km/s)、 $RE_d$  は相対動弾性係数(%),  $E_{dn}$  は凍害箇所動弾性係数(GPa)、 $E_{d0}$  は健全箇所の動弾性係数(GPa)である。

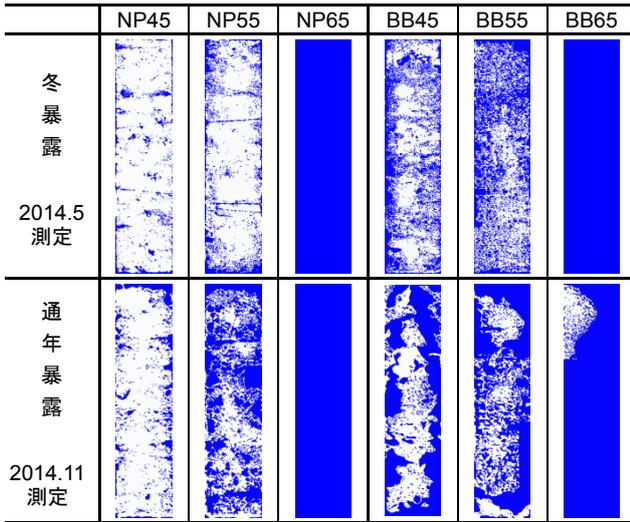


図-4 暴露面のスケーリング状況のスケッチ  
(塗りつぶしている部分はスケーリング)

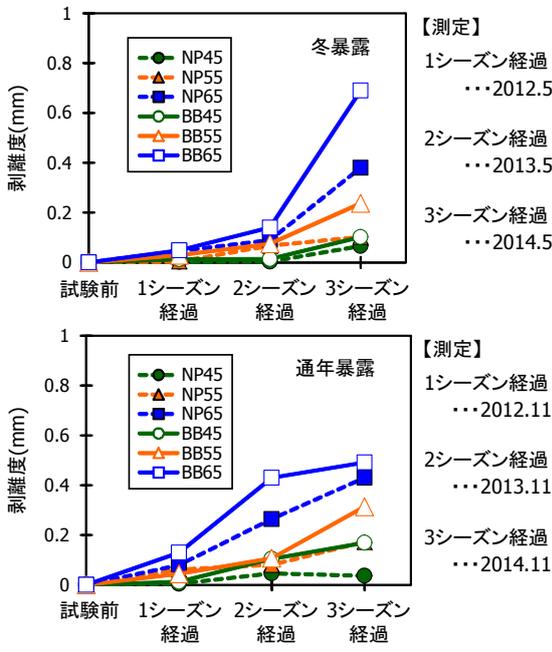


図-5 剥離度の経年変化

### 3. 実験結果・考察

#### 3.1 剥離度

図-4は3シーズン暴露した後の冬暴露と通年暴露のスケーリング状況のスケッチを示している。いずれの供試体も粗骨材は露出しておらず、細骨材の露出にとどまっていた。スケーリングは、水セメント比が大きい供試体ほど面的広範に発生している傾向にあった。

図-5に剥離度の経年変化を示す。全体的に高炉セメントB種を用いた方が剥離度は大きい傾向にあった。1～2シーズン経過時のNP65、BB65に着目すると、冬期の凍結融解に加え、夏期に乾燥を受ける通年暴露の方が剥離度はやや多い。コンクリートが凍結融解と乾燥を交互に受けると、膨張収縮が顕著に繰り返されるため弛緩が促進され、スケーリングしやすいことが実験的に確認

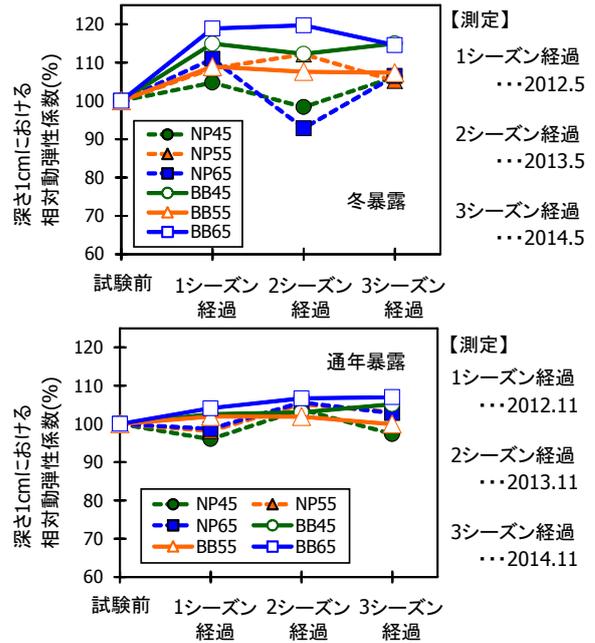


図-6 深さ1cmにおける相対動弾性係数の経年変化

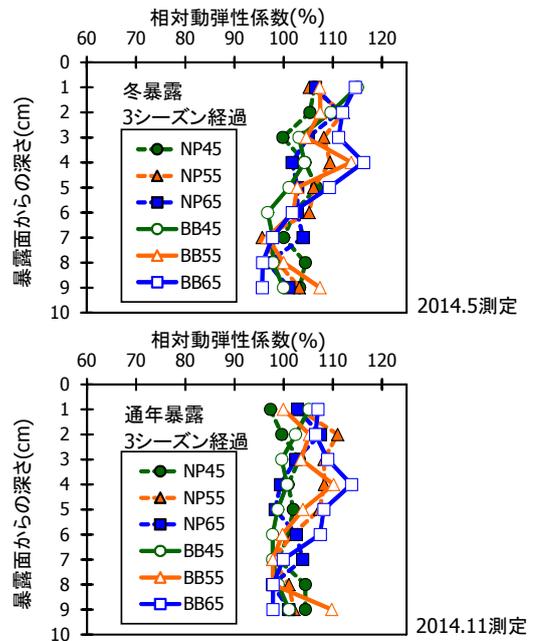


図-7 3シーズン経過後の内部の相対動弾性係数

されている<sup>8)</sup>。この特徴がスケーリングしやすい水セメント比の大きい供試体で表れたと考えられる。一方で、冬暴露のBB65は、2シーズン目から3シーズン目にかけて剥離度が大きく増加した。この考察は後述する。3シーズン経過後の剥離度は0～1mmの範囲にあった。

#### 3.2 相対動弾性係数

図-6は深さ1cmにおける相対動弾性係数の経年変化、図-7は3シーズン経過後の内部における相対動弾性係数を示している。深さ1cmにおいては、冬暴露は100%を上回る値、通年暴露は100%前後の値で経年している。冬暴露でみられたこの傾向は、内部全体ではなく、暴露面近傍で主に表れていることが図-7から読み取れる。

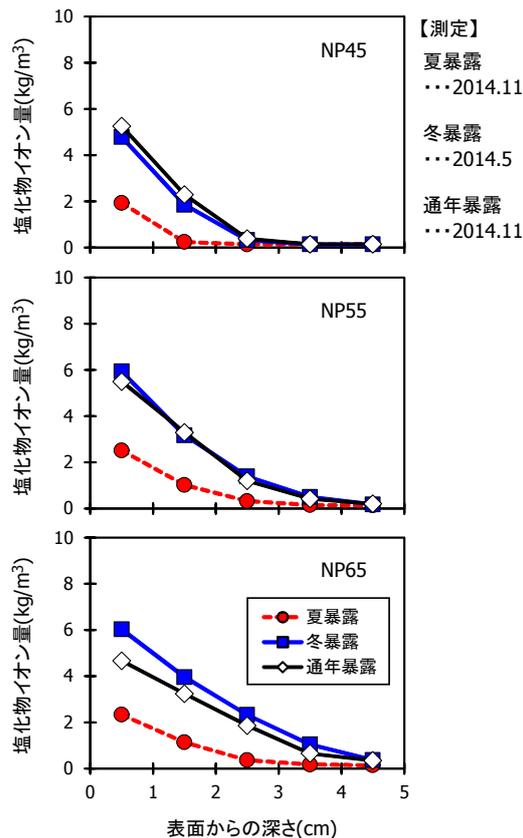


図-8 3シーズン経過後の塩化物イオン分布（普通）

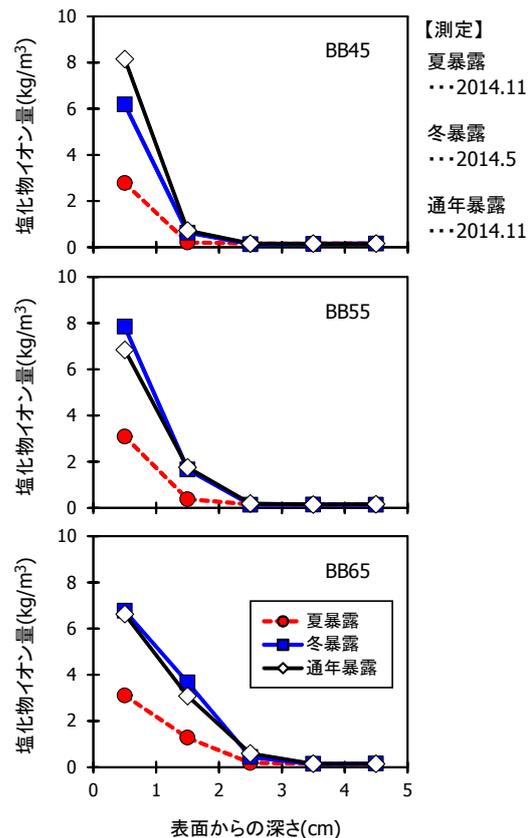


図-9 3シーズン経過後の塩化物イオン分布（高炉B）

夏期の間、通年暴露は最高 30℃程度の高温下に曝されるのに対し、冬暴露は写真-2 で示したように、比較的穏やかな屋内に保管される。相対動弾性係数は超音波伝播速度から求めているが、一般にコンクリートの含水率が高いと超音波伝播速度は大きくなる傾向にある<sup>9)</sup>。冬暴露は通年暴露に比べると高温下に曝される機会が少ないことから、暴露期間中に表層へ浸透した水分の多くが表層にそのまま残り、その結果、超音波伝播速度が大きくなり、相対動弾性係数が大きく表示されたと考えられる。3.1の図-5で示した2シーズン目から3シーズン目にかけての冬暴露のBB65の結果は含水率の影響と思われる。

供試体は3.1で述べたように、軽微ではあるが表層に凍害がみられることから、凍結融解の影響を受けている。しかし全体的に相対動弾性係数の低下は小さく、促進凍結融解試験と異なり、水分供給が降雨程度の気中に暴露した場合、耐凍害性に劣るコンクリートでも相対動弾性係数はほとんど低下しない既報<sup>10)</sup>に近い結果となった。

### 3.3 塩化物イオン量

#### (1) 塩化物イオン分布

図-8, 9に3シーズン経過後の塩化物イオン分布を示す。深さ0~1, 1~2, 2~3, 3~4, 4~5cmの各データは、中間の0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5cmにプロットしている（以下、それぞれ深さ0.5, 1.5, 2.5, 3.5, 4.5cmと記す）。いずれの配合も、暴露面に近い深さ0.5cmにおける

夏暴露の塩化物イオン量は、冬暴露の1/2~1/3であった。冬期の日本海は強い季節風が吹きやすく、特に1月は飛来塩分が多いことを述べた既報<sup>11)</sup>と良く対応している。なお、冬暴露の暴露面にはスケーリングが発生しており、このことも塩化物イオンの浸透促進に影響していると考えられる。また、通年暴露と冬暴露を比べると、深さ0.5cmの塩化物イオン量は概ね同程度で、分布の形もほぼ重なっていた。寒冷環境下における塩化物イオンの浸透は、冬期の環境に大きく依存すると言える。

図-10は深さ0.5cmの塩化物イオン量の経年変化を示している。夏暴露よりも冬・通年暴露の方が多い傾向は、1シーズン経過時から既に呈し、以降、概ね同程度の値で推移していることが確認された。

#### (2) 塩化物イオンの浸透予測に関する考察

##### a) 凍結融解を受けないコンクリートの拡散係数(夏暴露)

コンクリート標準示方書には、水セメント比と拡散係数との関係を表す式(6), (7)が示されている<sup>1)</sup>。

普通ポルトランドセメント

$$\log_{10} D = 3.0(W/C) - 1.8 \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad (6)$$

高炉セメントB種

$$\log_{10} D = 3.2(W/C) - 2.4 \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad (7)$$

図-11は式(6), (7)から求めた拡散係数の計算値と、

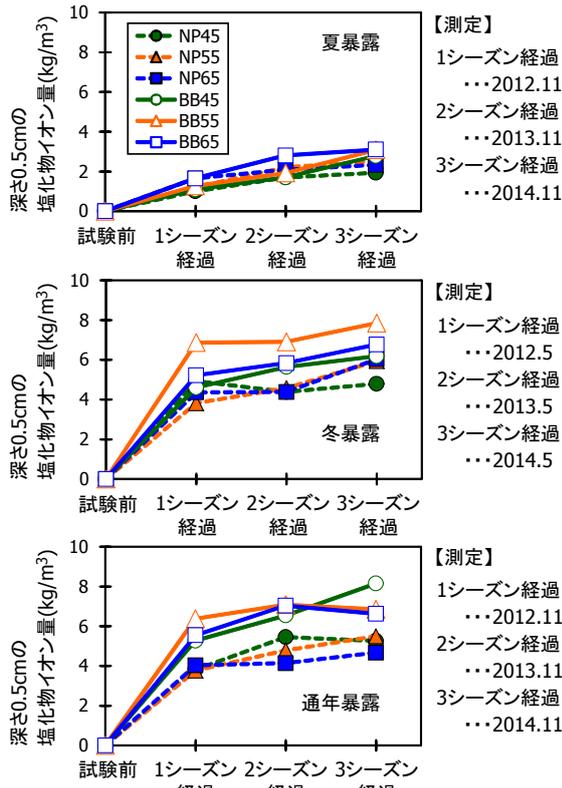


図-10 深さ 0.5cm の塩化物イオン量の経年変化

凍結融解を受けていない夏暴露の塩化物イオン分布から調べた拡散係数の実測値との比較を示している。実測値は、示方書の式から求めた計算値と概ね対応していた。

次に、凍結融解を受ける冬暴露と通年暴露における塩化物イオンの浸透予測について考察する。

b) 拡散係数を常時一定とした場合の予測(冬・通年暴露)

はじめに、拡散係数を常時一定とした式(1)による予測を行った。拡散係数は図-11の実測値を使用し、 $C_0$ はコンクリート標準示方書にならって  $9\text{kg/m}^3$  とした<sup>1)</sup>。図-12に塩化物イオン量の計算値と実測値の関係を示す。図にはシーズンごとに調べた全配合・全深さのデータを一括プロットした。発錆限界については、コンクリート標準示方書にセメントの種類と水セメント比から算出する式は示されているが、凍結融解を受ける場合は算出した値よりも小さくする<sup>1)</sup>旨が記載されているため、一般的な  $1.2\text{kg/m}^3$  とした。拡散係数を一定とした場合、塩化物イオン量の計算値が  $1.2\text{kg/m}^3$  未満でも実測値は  $1.2\text{kg/m}^3$  を上回るケースや、計算値は極めて小さいものの実測値が発錆限界に近いケースがいくつか確認された。

c) 凍害の進行に伴う拡散係数の経時変化を考慮した場合の予測(冬・通年暴露)

簡便に計算するため、深さ 0.5~1.5, 1.5~2.5, 2.5~3.5, 3.5~4.5cm の拡散係数はそれぞれ一定の割合で経年増加、すなわち、経時変化を一次関数で表せると仮定し、塩化物イオン量の計算値と実測値の残差平方和が最小となる

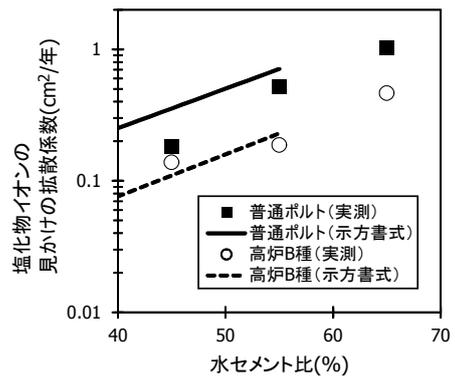


図-11 拡散係数の計算値(示方書)と実測値(夏暴露)

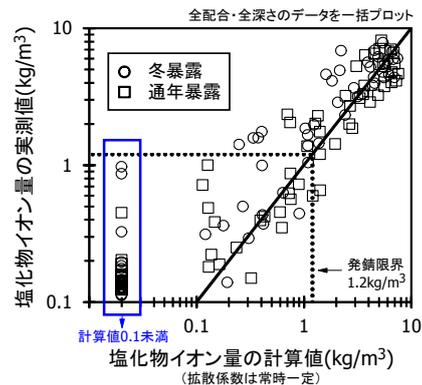


図-12 冬・通年暴露における塩化物イオン量の計算値(拡散係数を常時一定)と実測値

拡散係数の経年増加の割合を調べて、式(2)による予測を行った。図-13, 14は拡散係数の経年変化を調べた結果である。暴露期間は冬暴露が1.5年、通年暴露は3年で、3.1, 3.2で述べたように剥離度は0~1mmの範囲で相対動弾性係数はさほど低下していないが、冬暴露はNP45とBB65が深さ0~2.5cm, NP55,65は深さ0~3.5cm, 通年暴露はNP45,55,65が深さ0~3.5cmの範囲で拡散係数が増加していた。拡散係数の増加比は配合や深さにより異なるが、冬暴露は6~17倍、通年暴露は6~35倍であった。著者らは過年度の実験で平均スクーリング深さが1mmでも表層の拡散係数は50倍に増加することがある結果を得ており<sup>12)</sup>、暴露実験もこれに近い傾向となった。

図-15に塩化物イオン量の計算値と実測値の関係を示す。図-12に比べると計算値が  $1.2\text{kg/m}^3$  未満の範囲で実測値が  $1.2\text{kg/m}^3$  を上回るプロットは減少しており、差分解析による評価の有効性が暴露実験でも確認された。

4. まとめ

過年度の室内実験で得た、凍害によって拡散係数が経時的に変化する際の塩化物イオン浸透予測が Fick の拡散方程式の差分解析で比較的簡易に行える知見の妥当性を実環境で検証するため、寒冷地の沿岸部で3年間、暴露実験を行った。本研究の範囲で得た成果を以下に示す。

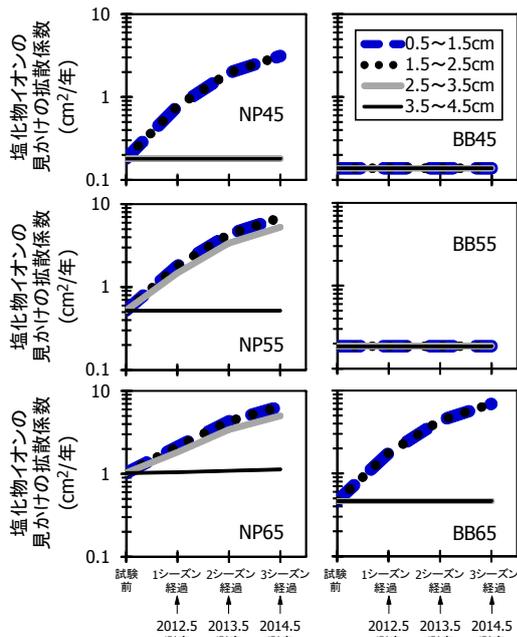


図-13 拡散係数の経年変化 (冬暴露, 凡例は深さ)

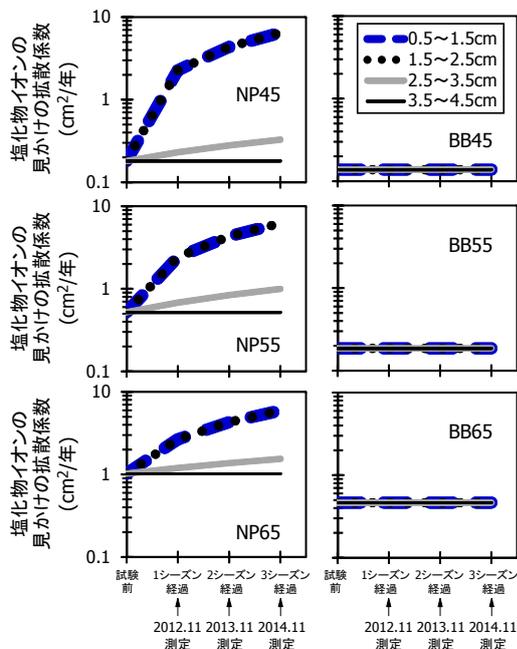


図-14 拡散係数の経年変化 (通年暴露, 凡例は深さ)

- (1) 実環境でも差分解により、凍害を考慮した塩化物イオン浸透予測を合理的に行うことができる。
- (2) 剥離度は0~1mm, 相対動弾性係数の低下は僅かだが、拡散係数は深さ0~3.5cmで最大35倍に増加した。  
 今後は寒冷環境下での劣化予測のさらなる信頼性向上に向け、水分供給が多い実環境下での検証を行うとともに、実構造物への適用に関する検討も深めていきたい。

参考文献

- 1) 土木学会：2012年度制定 コンクリート標準示方書「設計編」, pp.148-157, 2013.3
- 2) 守分教郎, 長滝重義, 大即信明, 三浦成夫：既設コ

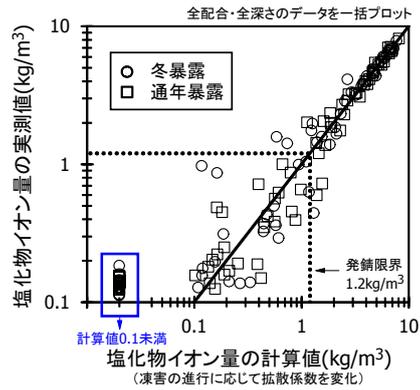


図-15 冬・通年暴露における塩化物イオン量の計算値(凍害の進行に応じて拡散係数を変化)と実測値

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

- 3) 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
- 4) 気象庁ホームページ
- 5) 日本コンクリート工学協会：コンクリート技術の要点'99, p.155, 1999.9
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 遠藤裕丈, 島多昭典, 田畑浩太郎：塩分環境下での凍害の進行に及ぼす乾燥・乾湿の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1024-1029, 2014.7
- 9) 林田宏, 田口史雄, 嶋田久俊：超音波伝播速度測定における実コンクリート構造物の凍害深さ推定について, 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, pp.71-76, 2006.12
- 10) 自然環境とコンクリート性能評価に関するシンポジウム委員会報告書・論文集, 日本コンクリート工学協会, pp.5-34, 2005.6
- 11) 富永禎秀, 地濃茂雄, 村田亨：数値気候モデルを用いた飛来塩分濃度分布の予測に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1043-1048, 2006.7
- 12) 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