

論文 塩分環境下での凍害の進行に及ぼす乾燥・乾湿の影響

遠藤 裕丈^{*1}・島多 昭典^{*2}・田畑 浩太郎^{*3}

要旨: 凍結防止剤と凍結融解の複合作用による凍害（スケーリング、ひび割れ）の進行に及ぼす夏季の乾燥・乾湿の影響の評価に向けて、凍結防止剤を含む融雪水に見立てた塩水を試験水に用いた凍結融解試験と乾燥および乾湿繰り返し試験を交互に行い、凍害の進行に及ぼす乾燥・乾湿の影響について調べた。その結果、凍結融解と乾燥・乾湿の交互作用によって生じる膨張収縮挙動は、塩水と凍結融解の複合作用による凍害の進行性と密接な関係にあることがわかった。また、乾燥・乾湿の影響を考慮した塩化物と凍結融解の複合作用による凍害の進行予測（予測式の係数の設定）の考え方についても整理した。

キーワード: 凍結融解, 塩化物イオン, 乾燥, 乾湿, 凍害, 劣化予測

1. はじめに

今後は厳しい社会情勢の下、人々の生活を支えるコンクリート構造物を効率的に維持し、長く使い続けていくことが求められる。そのためにはコンクリートの耐久性設計を適切に行うことが大切で、合理的な構造物の保全計画の策定に必要な劣化予測技術の向上が不可欠である。

例えば、寒冷環境下では走行車両の安全性を確保するために散布される凍結防止剤と凍結融解の複合作用による凍害（スケーリング、ひび割れ）ならびに塩化物イオン拡散係数の増加¹⁾が懸念される。さらに加えて、夏季は乾燥および乾湿の繰り返し作用を受ける。千歩ら²⁾は淡水を用いた凍結融解試験（ASTM C 666, A 法）を行い、コンクリートが乾湿繰り返しの影響を受けると耐凍害性が低下することを論じている。しかし一方で塩水を用いた場合の傾向については明確に整理されていない。

一般にコンクリートの耐凍害性は、実験室で凍結融解作用を連続的に与えることにより評価される。しかし、**図-1**に示すように、北海道のような寒冷地（ここでは代表して札幌、旭川、釧路を示す）においても夏季には30℃以上の真夏日が観測される³⁾。このため、凍結防止剤と凍結融解の複合作用による凍害の予測技術の向上を図るには、塩分環境下での凍害の進行に及ぼす乾燥・乾湿繰り返しの影響についても適切に評価する必要がある。

そこで、凍結防止剤を含む融雪水に見立てた塩水を試験水に用いた凍結融解試験と乾湿繰り返し試験を交互に行い、凍害（スケーリング、ひび割れ）の進行に及ぼす乾燥・乾湿の影響について調べた。

2. 実験概要

2.1 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

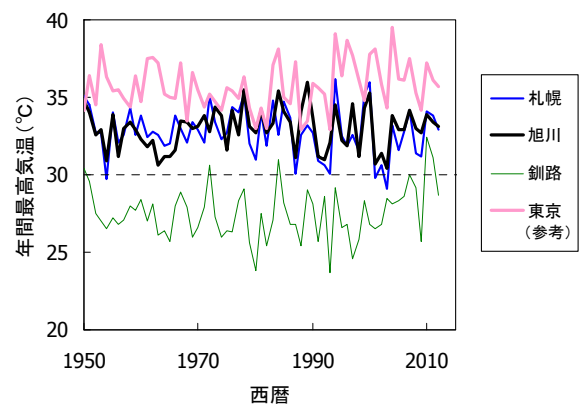


図-1 年間最高気温の推移³⁾のデータを基に作成

表-1 コンクリートの配合

記号	セメント	W/C (%)	単位量(kg/m ³)			
			W	C	S	G
NP55	普通	55	146	265	871	1067
BB55	高炉	55	147	267	865	1061

練混ぜにおいて、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

55%とした。セメントは高炉セメントB種（以下、高炉B種と記す）と普通ポルトランドセメント（以下、普通ポルトと記す）を使用した。ここでは、寒冷地での一般的な配合設計にあわせて、AEコンクリートとした。目標空気量は4.5±1.5%に設定した。細骨材は苫小牧錦岡産の海砂（表乾密度2.67g/cm³、絶乾密度2.65g/cm³、吸水率0.87%、粗粒率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/cm³、絶乾密度2.62g/cm³、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。それぞれの配合には、セメントの種類（高炉B種：BB、普通ポルト：NP）と水セメント比を組み合わせた

*1 独立行政法人土木研究所 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 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 上席研究員 (正会員)

*3 国土交通省 北海道開発局 札幌開発建設部 岩見沢道路事務所 (非会員)

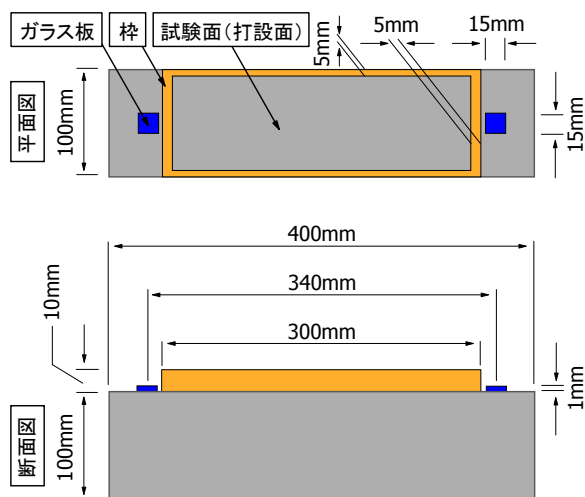


図-2 供試体

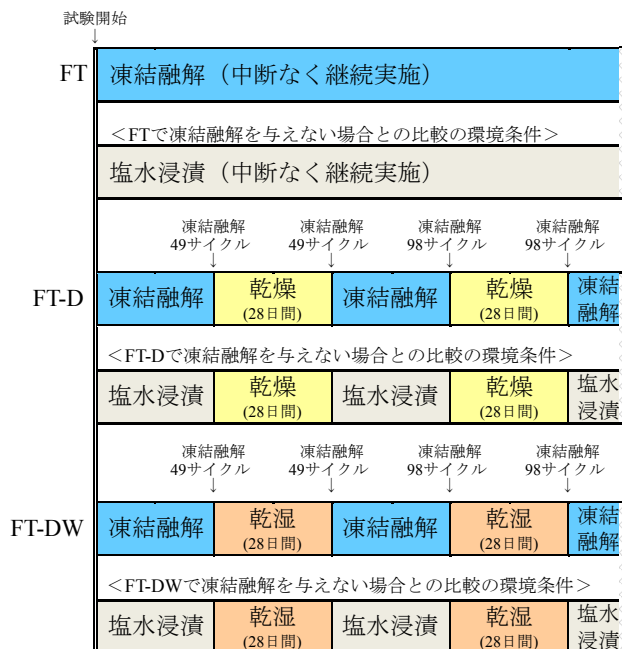
記号を付けた。

2.2 供試体

図-2に供試体を示す。寸法は10×10×40cmとし、材齢7日まで湿った麻布で覆った後、試験開始材齢の28日まで恒温恒湿室（温度20℃、湿度60%）に静置した。後述する凍結融解試験では構造物の状態にあわせて供試体の一面からのみ試験水を供給させることとし、発泡スチロールを使用して試験水を張るための枠を作製し、材齢21日に試験面に据え付けた。試験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とした。凍結融解と乾燥もしくは乾湿繰り返しを交互に与えた際の長さ変化を調べるため、標線用ガラス板を打設面に貼り付けた。供試体は1配合あたり4個（うち、3個は凍結融解試験と長さ変化測定、1個は塩化物イオン測定に使用）作製した。

2.3 実験方法

供試体に与える環境条件を図-3に示す。試験水は塩水とし、ここでは濃度3%の塩化ナトリウム水溶液を使用した。凍結融解試験はASTM C 672を準用し、塩水を深さ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。凍結融解試験は300サイクルまで行い、途中、概ね50サイクルおきに凍結融解試験を中断し、夏季の環境に見立てた乾燥もしくは乾湿繰り返し作用を28日間与えた（本実験では49、98、154、203、252サイクルに中断を実施）。中断期間は塩水を除去して乾燥機へ供試体を格納し、乾燥のみ与える供試体は28日間そのまま静置させ、乾湿繰り返しを与える供試体は4日間おきに試験面を塩水に3日間接触させる作業（乾燥4日間、湿潤3日間）を繰り返し行った。乾燥温度は図-1で示した札幌、旭川の最高温度が35～40℃の範囲にあることに鑑み、40℃に設定した。乾燥機内部の湿度は約17%（実測値）である。ここでは継続的に凍結融解作用を与えるものにはFT、途中で凍結融解試験を中断して乾燥のみ与



比較の環境条件に示した塩水浸漬の期間は凍結融解の期間と同じである

図-3 供試体に与える環境条件

えるものにはFT-Dならびに乾湿を繰り返し与えるものにはFT-DWの記号を付けた。また、凍結融解を与えない場合との比較を行う理由から、「凍結融解」を「塩水浸漬のみ」に置き換えた環境条件についても別途設けた。

2.4 測定項目

本実験ではスケーリング量、相対動弾性係数、長さ変化、塩化物イオン量の測定を行った。スケーリング量は剥離片を採取し、110℃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に発・受振子をあてて深さ1、2、…、9cmの超音波伝播速度を測定し、式(1)⁴⁾より各深さの相対動弾性係数を求めた。

$$\begin{cases} E_{dn} = 4.0387V_n^2 - 14.438V_n + 20.708 \\ RE_d = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \times 100 \end{cases} \quad (1)$$

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(%)である。凍結融解を受けていないコンクリートの動弾性係数 E_{d0} (GPa)は、一般に凍結融解試験前の測定値が与えられるが、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、図-3で示した「凍結融解」を「塩水浸漬のみ」に置き換えた環境下に同じ期間だけ曝した供試体の動弾性係数を E_{d0} とすることとした。長さ変化の測定はJIS A 1129のコンパレータ法に準じて行った。加えて、FT-D、FT-DWについては、乾燥ならびに乾湿期間中も測定を行った。スケーリング量、相対動弾性係数、長さ変

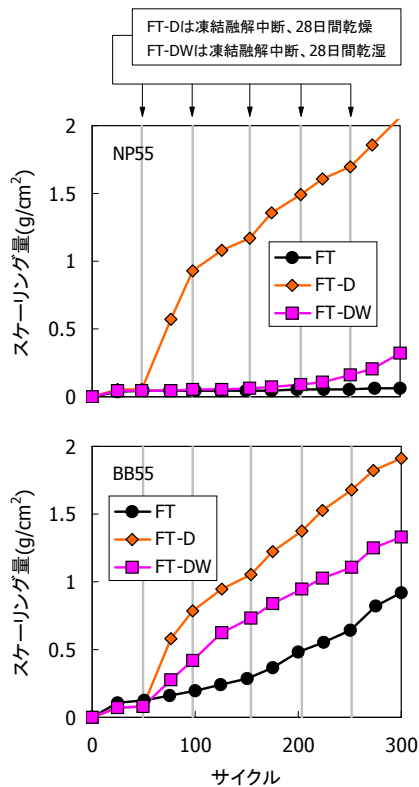


図-4 スケーリング量の測定結果

化は供試体3個の平均とした。また、測定条件を統一するため、相対動弾性係数と長さ変化の測定はいずれの配合も凍結融解試験の融解行程終了直後から開始することとした。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。ここでは試験終了時における剥離面から深さ0~5cmの範囲における全塩化物イオン量の濃度分布を調べた。

3. 実験結果・考察

3.1 スケーリング量

図-4にスケーリング量の測定結果を示す。NP55とBB55のFTを比較すると高炉B種を用いた方がスケーリング量は多く、既往の研究⁵⁾と対応する結果となった。FT-Dは、NP55とBB55のいずれも途中で乾燥を与えた方がスケーリング量は大きく増加する結果が示された。FT-DWは、BB55についてはFTに比べるとスケーリング量は増加しているものの、FT-D以下の値であった。NP55はFTとほぼ同程度のスケーリング量であった。これらの傾向についての考察は3.3および3.5で後述する。

3.2 相対動弾性係数

図-5に深さ1cmの相対動弾性係数の推移を示す。FTはAEコンクリートを用いている関係もあって、相対動弾性係数は全体的に90%以上の高い値で推移した。一方、FT-DならびにBB55のFT-DWでは、150サイクル以降において相対動弾性係数の低下の割合が大きくなる挙動が確認された。凍結融解の合間に与えた乾燥が耐凍害性に影

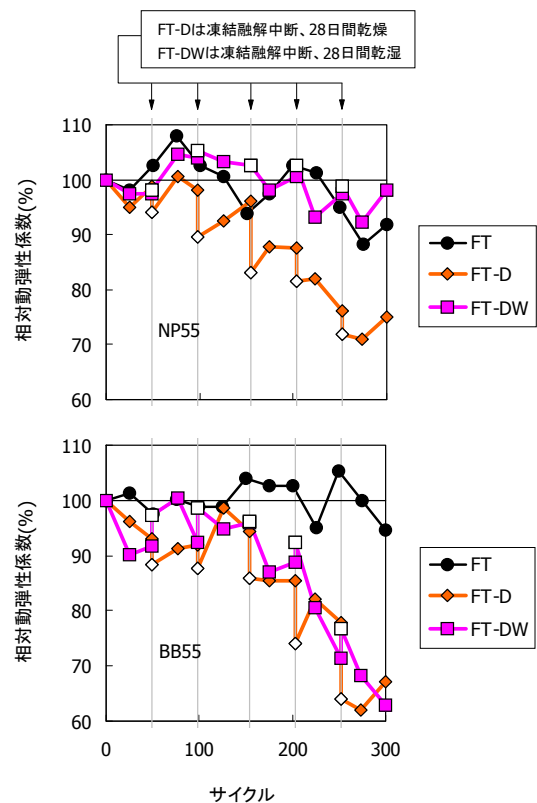


図-5 深さ1cmの相対動弾性係数の推移

塗りつぶしのマーカーは凍結融解試験直後、白抜きマーカーは乾燥、乾湿作用を与えた後に調べた値

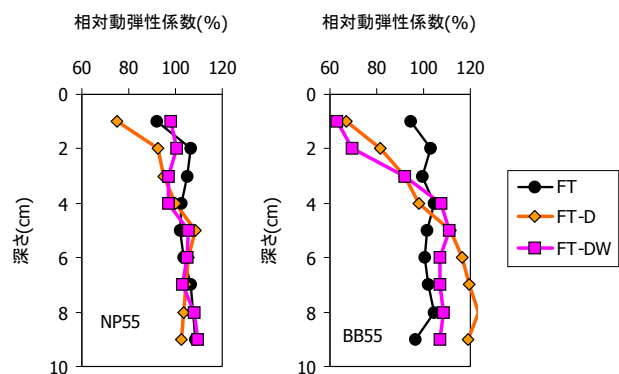


図-6 凍結融解試験終了時(300サイクル)における内部の相対動弾性係数

響を及ぼしていることが読み取れる。しかしながら、NP55についてはFTとFT-DWの双方のプロットが重なり合うように推移しており、前述のスケーリング量の測定結果と同様、乾湿の影響は明確に示されなかった。

図-6は凍結融解試験終了時(300サイクル)における内部の相対動弾性係数を示している。乾燥を与えたものは表層近傍で相対動弾性係数低下が認められた。FTとNP55のFT-DWについては、差が明確に表れなかった。

3.3 長さ変化

図-7に長さ変化の測定結果を示す。図には凍結融解を与えた場合の結果に加え、比較のために行った「凍結

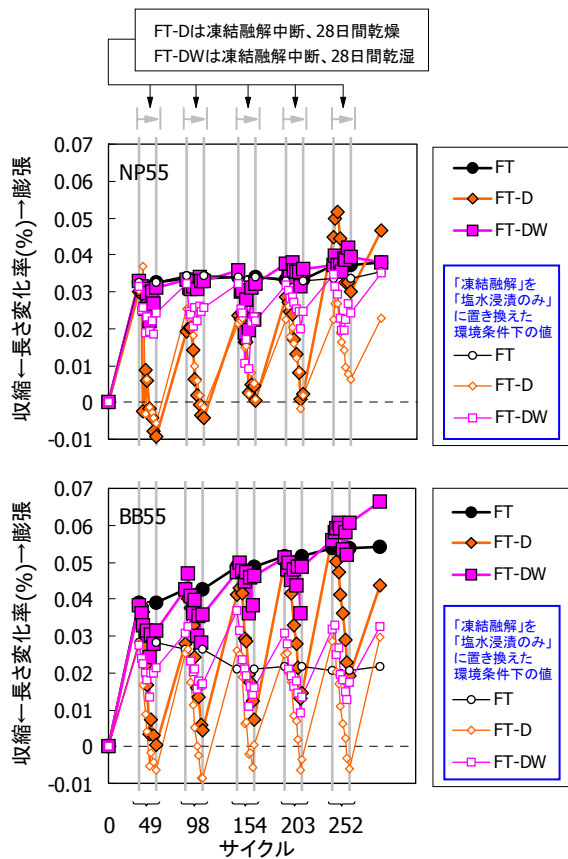


図-7 長さ変化の測定結果

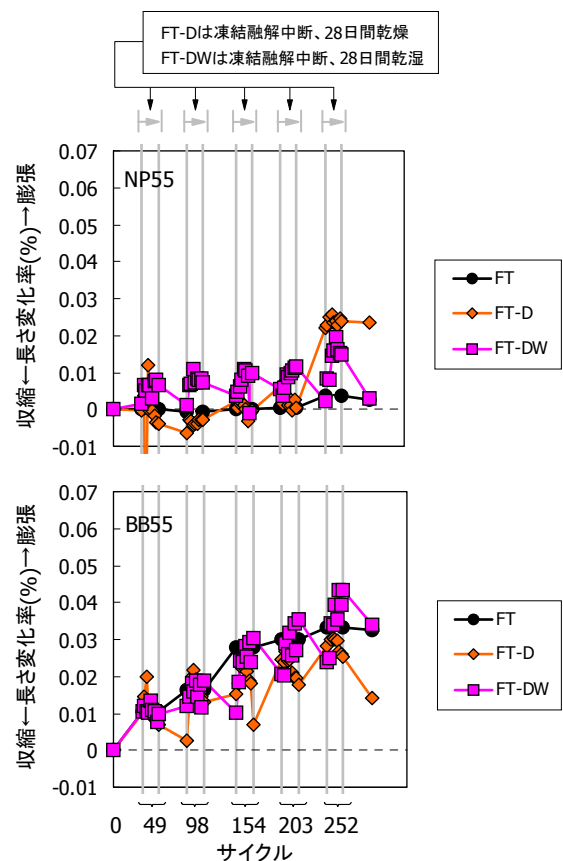


図-8 長さ変化に及ぼす凍結融解の影響

融解」を「塩水浸漬のみ」に置き換えた場合の結果も併記した。一般にコンクリートは常温下で吸水を受けると膨張する⁹⁾が、この傾向は塩水を用いた場合でも同様であることが「塩水浸漬のみ」の結果から言える。凍結融解を与えた場合の結果に着目すると、NP55とBB55のいずれもFTは経時的に膨張挙動を示したのに対し、FT-Dは顕著な膨張収縮挙動を呈した。一方、FT-DWの膨張収縮挙動はFT-Dに比べると小さく、NP55に関してはFTと概ね同程度の挙動で推移した。この結果と前述のスケールリング量の結果(図-4)を見比べると、膨張収縮挙動が大きい供試体ほどスケールリング量が多い傾向が見受けられ、長さ変化の程度は凍害の進行性と密接な関係にあることが読み取れる。相対動弾性係数(図-5および図-6)についても同様の傾向がみられる。比較的振幅が大きい膨張収縮挙動の影響によって微細クラックが多く発生・進展し、コンクリート組織の弛緩・脆弱化が促進されたために凍害が大きく進行したことが考えられる。これは千歩ら²⁾の報告と一致する。FT-D同様、凍結融解試験を中断して乾燥を与えたFT-DWは、乾燥の合間に定期的にと与えた湿潤によって膨張収縮挙動が抑制され、組織の弛緩・脆弱化が軽減されたために、凍害の促進はFT-D以下に抑えられたと言えよう。塩水を用いて一面凍結融解試験を行った本実験においては、乾湿繰り返しよりも乾燥の影響が大きい傾向が示された。

ここで、「凍結融解」を与えた場合の長さ変化から、「凍結融解」を「塩水浸漬のみ」に置き換えた場合の長さ変化の差を求めて、長さ変化に及ぼす凍結融解の影響について調べた。図-8に結果を示す。全体的には膨張を呈していた。これは水分の凍結膨張の影響を示している。また特徴的な傾向として、図-7でみられたFT、FT-D、FT-DWの長さ変化の差は全体的にほとんど認められなかった。すなわち、FT-D、FT-DWで確認された凍害の促進は凍結水量の増加に起因する凍結膨張の増大によってもたらされたものではなく、凍結融解と乾燥の繰り返しによる膨張収縮挙動に起因する組織の脆弱化によってもたらされたものと言える。凍結融解と乾燥の交互作用による膨張収縮挙動は、塩水と凍結融解の複合作用による凍害の促進に影響を及ぼすことがわかった。

3.4 塩化物イオン量

凍結融解試験終了時(300サイクル)における塩化物イオン量の測定結果を図-9に示す。この図では深さ0~1cmの測定値を0.5cmにプロットし、以降、同様に深さ1~2cmは1.5cm、深さ2~3cmは2.5cm、深さ3~4cmは3.5cm、深さ4~5cmは4.5cmにプロットしている。なお、スケールリング量が極めて大きい供試体の表層の塩化物イオン量については深さ0~1cm、深さ1~2cmといった1cmおきの区分けではなく、深さ0~2cm、深さ0~3cmといったようにある程度大括りで分析を行い、その中間(例えば前者

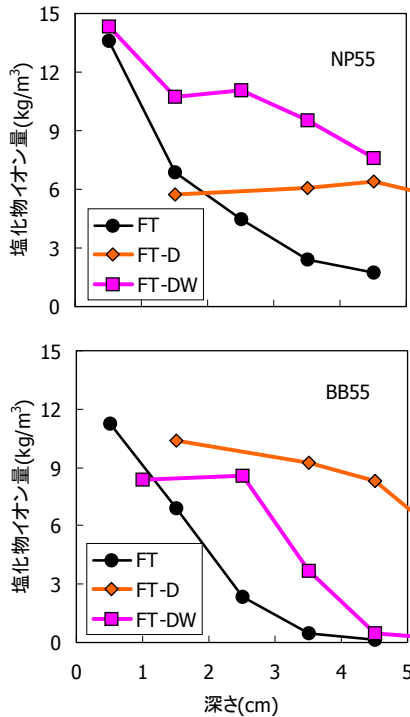


図-9 凍結融解300サイクルにおける塩化物イオン量の測定結果

は1cm, 後者は1.5cm) に測定値をプロットした。塩化物イオン量はFTに比べるとFT-D, FT-DWの方が多い傾向にあり, 乾燥と湿潤が繰り返される環境下では塩化物イオンは浸透しやすい既往の知見⁷⁾と対応する結果となった。

ここで, 塩化物イオンの浸透に及ぼす凍結融解の影響を把握するため, 「凍結融解」を「塩水浸漬のみ」に置き換えた場合の塩化物イオン量の測定値との比較を行った。図-10に結果を示す。NP55のFTを除くと凍結融解を与えた方が内部の塩化物イオン量は多かった。また, その傾向は乾燥・乾湿を与えたシリーズで顕著に表れていた。塩化物イオンの浸透に及ぼす凍結融解と乾燥・乾湿の相互作用の影響が大きいことが確認された。

3.5 乾燥・乾湿の影響を考慮した塩化物と凍結融解の複合作用による凍害の進行予測に関する考察

本実験で得た成果の範囲で, 乾燥・乾湿の影響を考慮した塩化物と凍結融解の複合作用による凍害の進行予測について考察を行う。

コンクリートの凍害進行予測式は土木学会コンクリート標準示方書に未だ示されていないが, 幾つかのモデルが提案されている。例えば既研究では比較的簡易なモデルとして, スケーリングは式(2)⁸⁾, 相対動弾性係数は式(3)⁹⁾が示されている (図-11に概念を示す)。

$$SC = ae^{b \log \frac{cyc}{A}} \quad (2)$$

$$RE_d = 100e^{-c \cdot cyc^d} \quad (3)$$

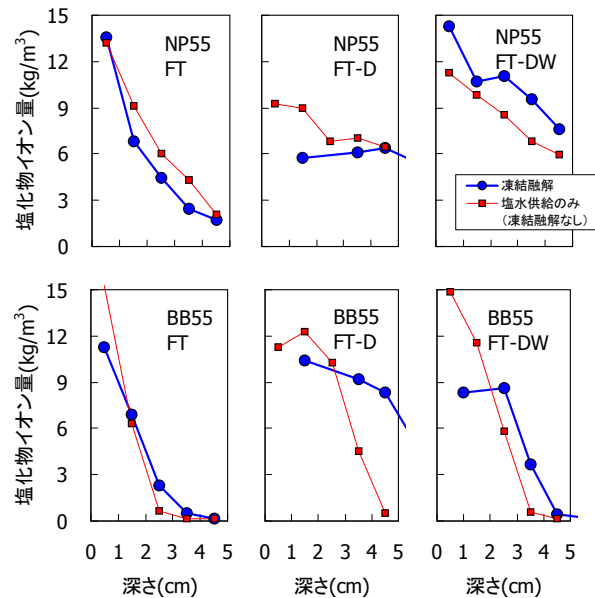


図-10 塩化物イオンの浸透に及ぼす凍結融解の影響

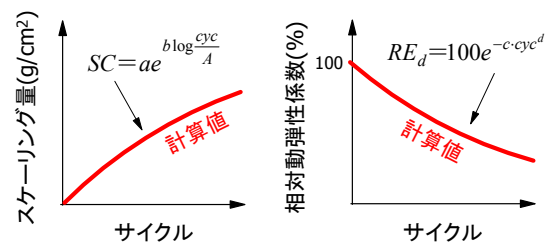


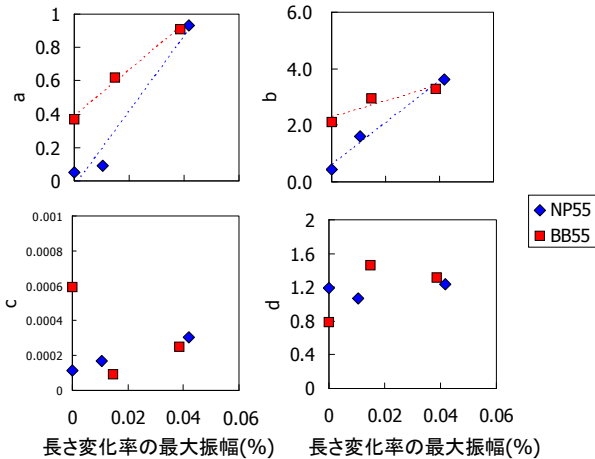
図-11 凍害劣化予測の概念

ここに, SC はスケーリング量(g/cm^2), cyc はサイクル, A はサイクルを無次元化させるための係数 (ここでは, 凍結融解試験終了サイクルである 300 の中間をとって 150 とした), a, b, c, d は条件によって定まる係数である。ここでは, 環境条件に起因する劣化の進行性の変化を経時的に変化しない等価な式で表現することを試みた。なお, 相対動弾性係数については, ここでは代表して深さ 1cm を考察の対象とした。

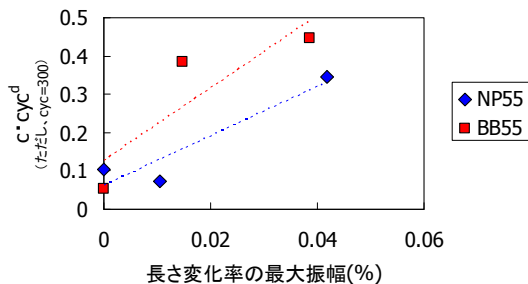
図-4 および図-5 で示した実測値と計算値の残差が最小となる a, b, c, d を回帰分析により求めた結果を表-2 に示す。また, 図-7 における FT と FT-D および FT-DW との測定値の差の最大値を長さ変化率の最大振幅と定義し (値が大きいほど乾燥・乾湿による膨張収縮挙動が大きいことを意味する), 長さ変化率の最大振幅と a, b, c, d の関係について調べた結果を図-12 に示す。スケーリングの予測式の係数 a, b は, 長さ変化率の最大振幅に対応して増加する傾向が示され, スケーリングについては, 乾燥の程度すなわち構造物の立地環境の状況に応じて a, b をそれぞれ増やす方向で変化させることにより予測を行うことができることがわかった。一方, 相対動弾性係数の予測式の係数 c, d は, 長さ変化率の最大振幅との明確な相関が認められなかった。一方で図-13

表一2 凍害進行予測式の係数の解析結果

記号		係数 (Aは150)			
配合	環境	a	b	c	d
NP55	FT	0.05	0.43	0.0001	1.20
	FT-D	0.93	3.62	0.0003	1.23
	FT-DW	0.09	1.61	0.0002	1.07
BB55	FT	0.37	2.11	0.0006	0.79
	FT-D	0.91	3.27	0.0003	1.31
	FT-DW	0.62	2.96	9×10^{-5}	1.47



図一12 長さ変化率の最大振幅とa, b, c, dの関係



図一13 長さ変化率の最大振幅と式(3)の指数 (c・cyc^d)との関係 (cycは終了サイクルの300として計算)

に示すように、長さ変化率の最大振幅は式(3)の指数 (c・cyc^d, なお、cycは終了サイクルの300としている) とは概ね対応していることがわかる。c, dについては、a, bのように乾燥の程度に応じてそれぞれの係数を単純に増加させる対応ではなく、式(3)の指数が適切な値となるよう総合的に定める必要があることがわかった。

4. まとめ

凍結防止剤と凍結融解の複合作用による凍害（スケーリング、ひび割れ）の進行に及ぼす夏季の乾燥・乾湿の影響の評価に向け、凍結防止剤を含む融雪水に見立てた塩水を試験水に用いた凍結融解試験と乾燥もしくは乾湿繰り返し試験を交互に行い、凍害の進行に及ぼす乾燥・乾湿の影響について調べた。今回行った実験の範囲で得られた知見をまとめると、以下ようになる。

(1) 凍結融解と乾燥・乾湿の交互作用によって生じる膨

張収縮挙動は、塩水と凍結融解の複合作用による凍害の進行性と密接な関係にある。

(2) スケーリングの進行予測は、長さ変化率の最大振幅に応じて個々の係数 (a, b) を増加させることで行うことができる。一方、相対動弾性係数の予測は、予測式の指数が適切な値となるよう係数 (c, d) を総合的に定める必要がある。

本論では、乾燥・乾湿の程度を長さ変化率の最大振幅で表現することで、凍害の進行に及ぼす乾燥・乾湿の影響を定量的に説明した。しかしながら、実環境下では全ての構造物の長さ変化の最大振幅を継続的に調べることは現実的ではなく、設計ではアメダスなどの気象データをもとに乾燥・乾湿の程度を設定することとなると考える。そのためには実環境下でのデータの取得、解析を重ねる必要がある、これについては今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 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
- 2) 千歩修, 濱田英介, 友澤史紀: 乾湿繰り返しコンクリートの吸水性状と耐凍害性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.731-736, 2003.
- 3) 気象庁ホームページ
(<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>)
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 社団法人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.64, 1999.9
- 7) 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'02「基礎編」, p.40, 2002.1
- 8) 独立行政法人寒地土木研究所: 凍結融解と塩化物による複合劣化に対するコンクリートの耐久性設計法および表面含浸材を活用した耐久性向上に関する研究, 寒地土木研究所報告, 第133号, p.141, 2011.3
- 9) 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