

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：田口史雄、島多昭典、三原慎弘、遠藤裕丈、
田畑浩太郎、川村浩二、葛西隆廣、渡辺淳、
鈴木哲

【要旨】

凍害による種々の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、平成 25 年度は、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および塩化物イオンの浸透に関する評価式を開発するため、複合劣化実験による(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、(2)塩化物イオンの浸透性への影響の評価と、構造物調査による(3)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を行った。複合劣化実験では、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、塩化物イオンの浸透に及ぼす夏季の乾燥・乾湿の影響を調べるため、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と乾燥および乾湿の繰り返し試験を実施した。構造物調査では前年度に続いて、北海道山間部に位置する道路橋の橋台での剥離度、採取コアによる相対動弾性係数ならびに塩化物イオン量の調査を行った。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。一方、構造物調査では設計かぶり位置の塩化物イオン量は凍結防止剤の散布量だけでなく、コンクリートの凍害の程度とも関係がある結果が示された。

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効率的に図るためには、合理的な耐久性設計が重要である。耐久性設計にあたっては、劣化状況の実態に即した劣化予測手法の充実・整備が求められている。

寒冷地における代表的な劣化に凍結融解と塩化物（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。現在の凍害の進行評価は、相対動弾性係数で示されるひび割れ¹⁾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、一般的には簡便化のため、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劣化予測が行われている¹⁾。しかし、実際はひび割れに加えて、スケーリングが同時に発生・進行する場合は殆どで、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行っている。平成 25 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、(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、(2)塩化物イオンの浸透性への影響の評価、(3)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、の 3 項目について調査・実験を行った。

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および塩化物イオンの浸透性への影響の評価に関する複合劣化実験

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、

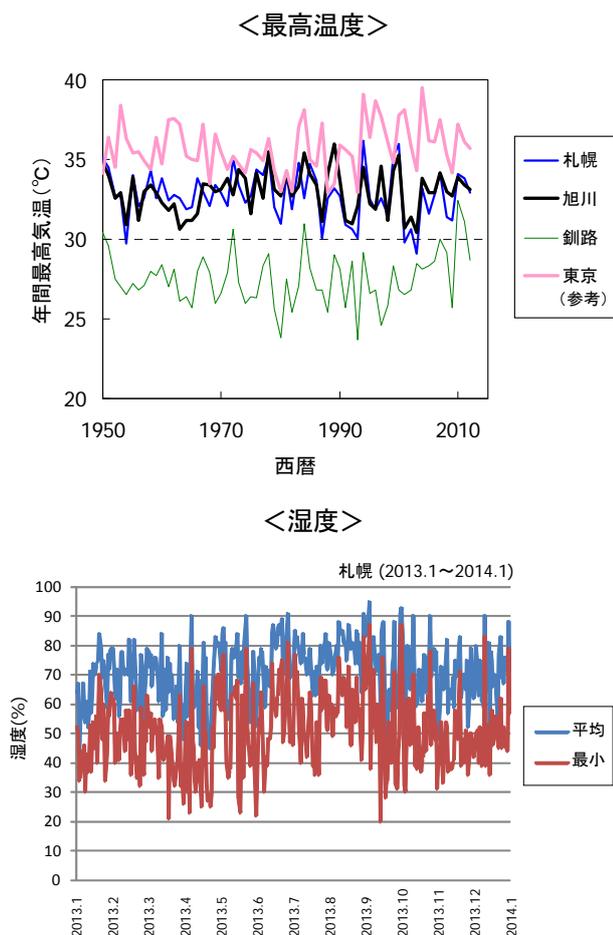


図-1 年間最高気温および湿度の推移 ³⁾のデータを基に作成

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

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。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°C 以上の真夏日が観測され、さらには乾湿の繰り返しも起きている 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

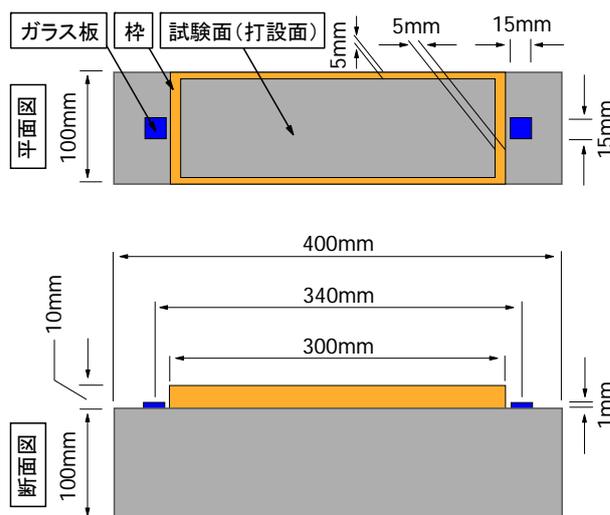


図-2 供試体

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。

2.1 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記号を付けた。

2.1.2 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°C、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

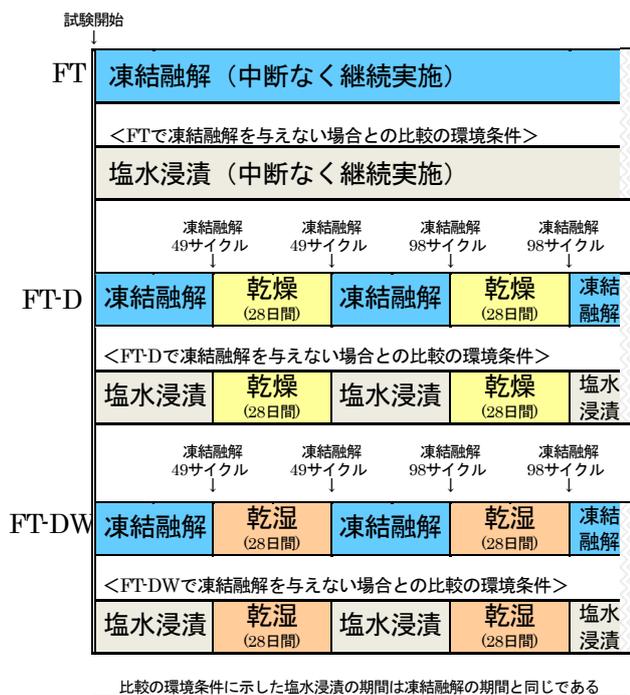


図-3 供試体に与える環境条件

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。

2.1.3 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。

2.1.4 測定方法

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

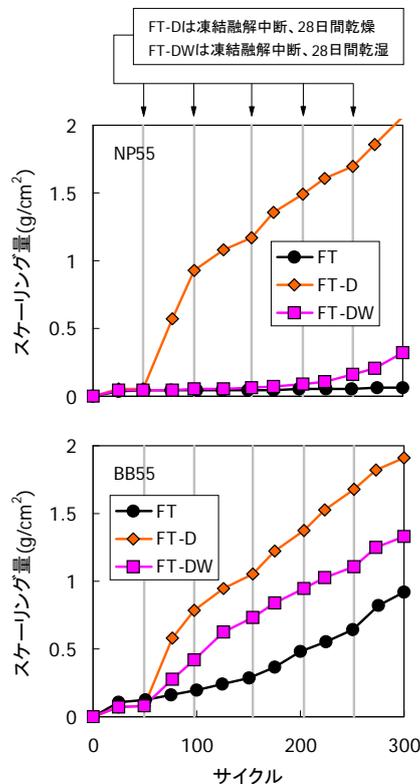


図-4 スケーリング量の測定結果

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

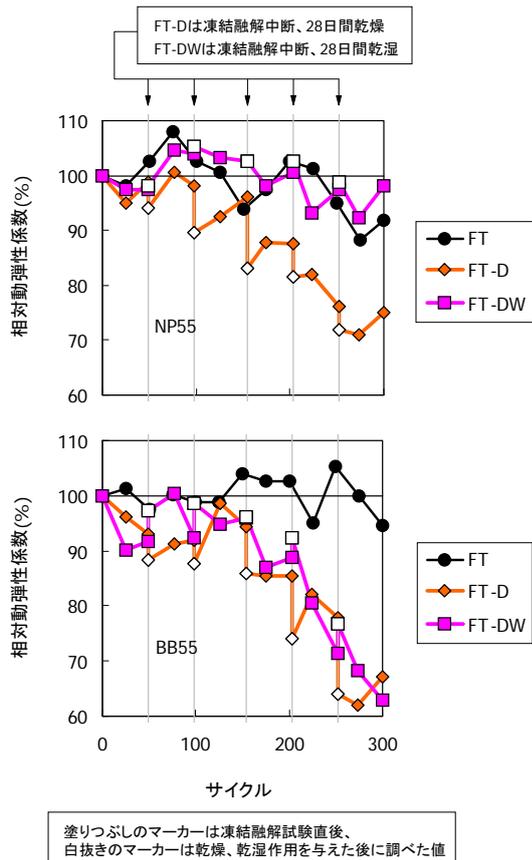


図-5 深さ1cmの相対動弾性係数の推移

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。

2.2 実験結果・考察

2.2.1 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

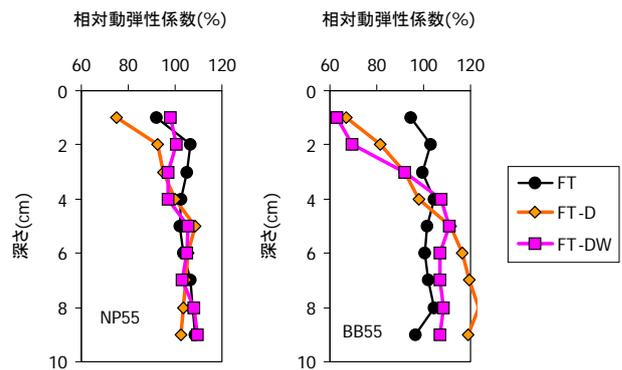


図-6 凍結融解試験終了時（300サイクル）における内部の相対動弾性係数

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2.2.3および2.2.5で後述する。

2.2.2 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な低下が認められた。FTとNP55のFT-DWについては、差が明確に表れなかった。

2.2.3 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「塩水浸漬のみ」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⁶⁾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

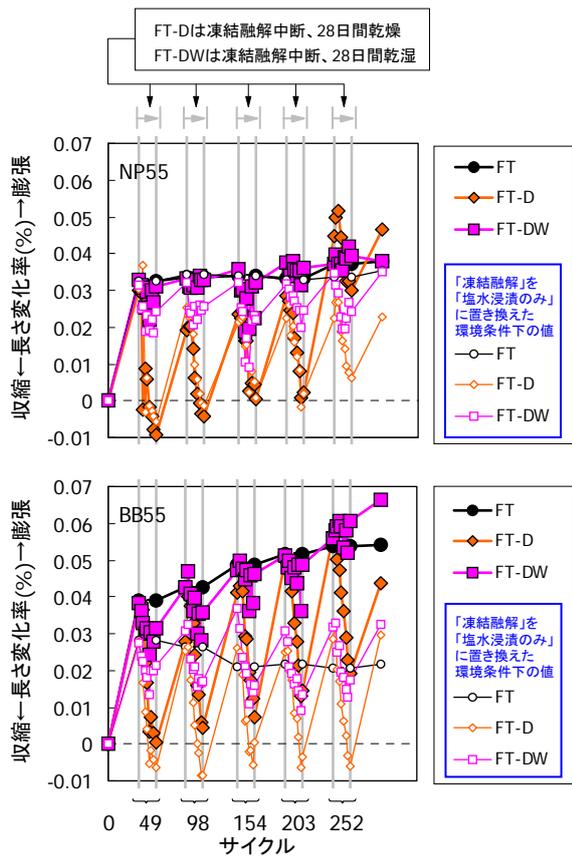


図-7 長さ変化の測定結果

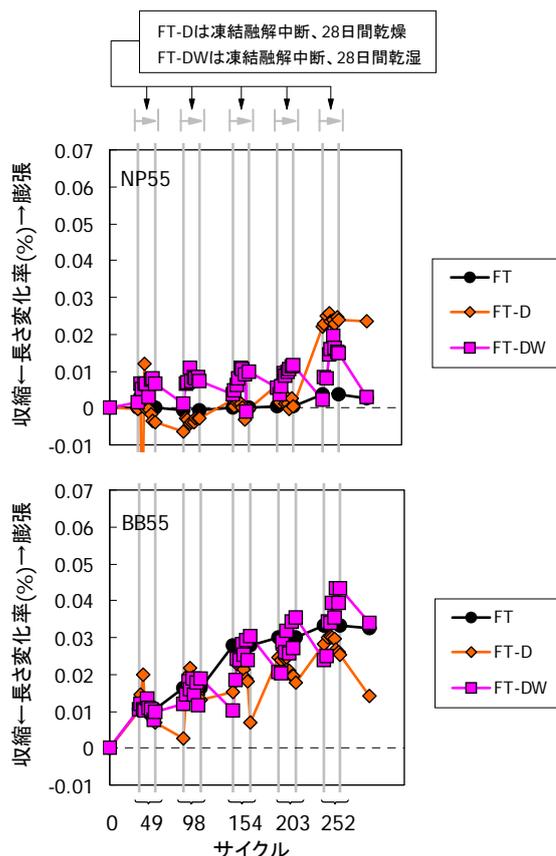


図-8 長さ変化に及ぼす凍結融解の影響

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

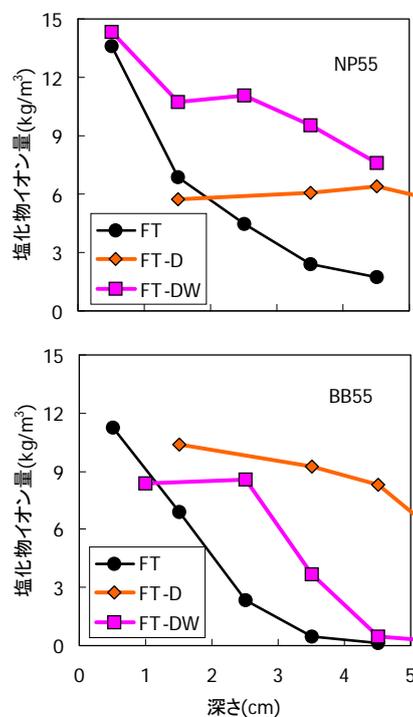


図-9 凍結融解300サイクルにおける塩化物イオン量の測定結果

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の長さ変化の差は比較的小さかった。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る以上に、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。

2.2.4 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の方が多量傾向にあり、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、FT-D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明らかに多かった。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・乾湿の交互作用の影響が大きいことが確認された。

2.2.5 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ル量は式(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)。

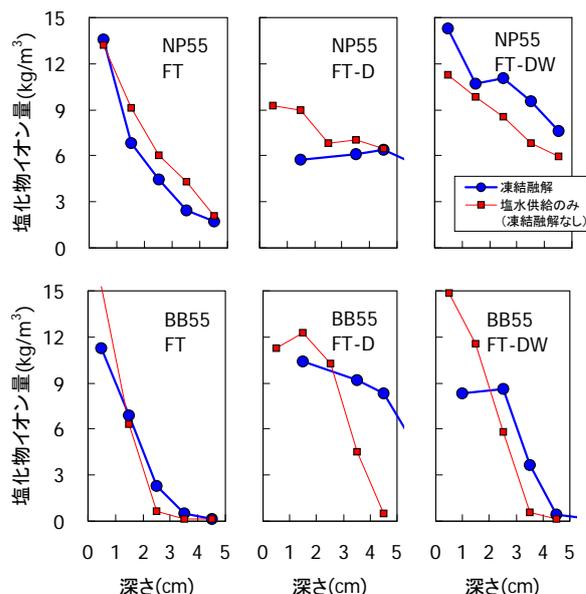


図-10 塩化物イオンの浸透に及ぼす凍結融解の影響

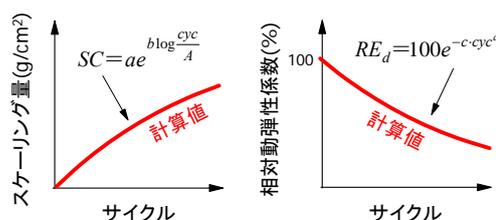


図-11 凍害劣化予測の概念

表-2 凍害進行予測式の係数の解析結果
(c、dは深さ1cmの値)

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-DW	0.62	2.96	9×10 ⁻⁵	1.47

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

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

ここに、SCはスケール量(g/cm²)、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

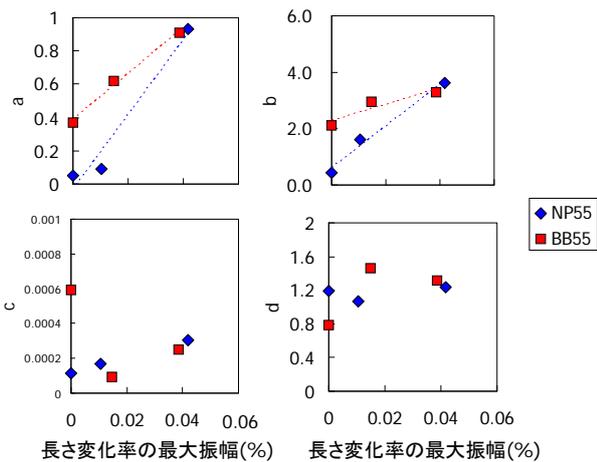


図-12 長さ変化率の最大振幅とa、b、c、dの関係 (c、dは深さ1cmの値)

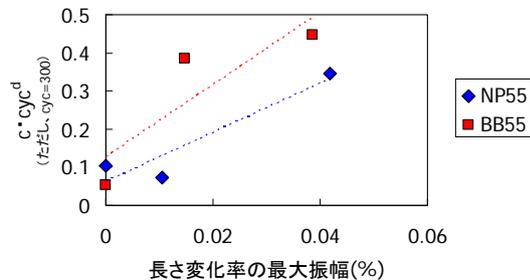


図-13 長さ変化率の最大振幅と式(3)の指数(c・cyc^d)との関係 (考察の対象は深さ1cm、cycは終了サイクルの300として計算)

として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。

(1) 考察1：予測式の係数に及ぼす乾燥・乾湿の影響

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。なお、本項においては、相対動弾性係数の予測式の係数c、dは代表して凍結融解の影響を最も受けやすい深さ1cm(図-6)の値を示した。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

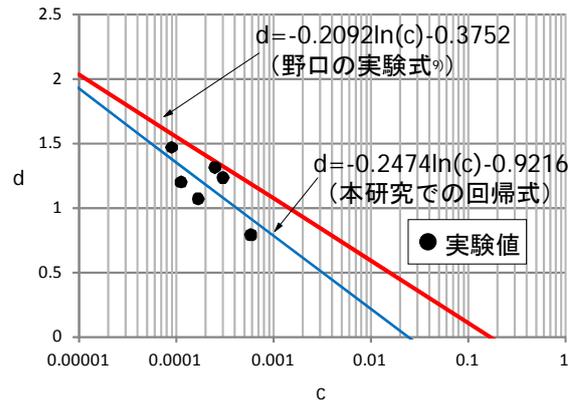


図-14 深さ1cmのcとdの関係

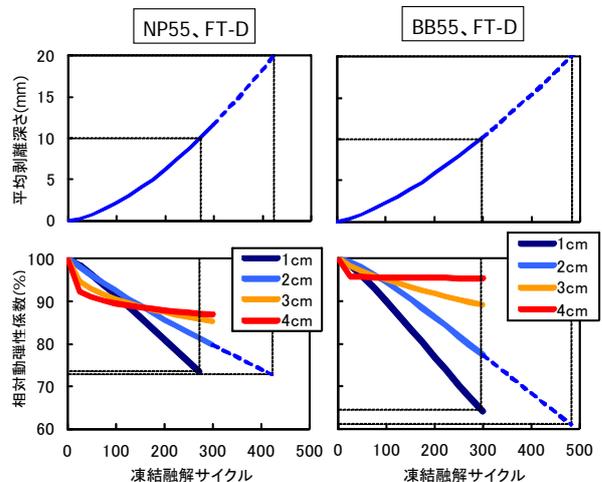


図-15 凍害進行予測の結果 (NP55とBB55のFT-D)

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、さらには図-14に示すように、cの自然対数値とdの関係は、野口の研究⁹⁾と同様にほぼ一つの直線として表すことができることが確認された。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は難しいものの、式(3)の指数の値であるc・cyc^dを適切に定めることにより、図-14の関係式を用いるこ

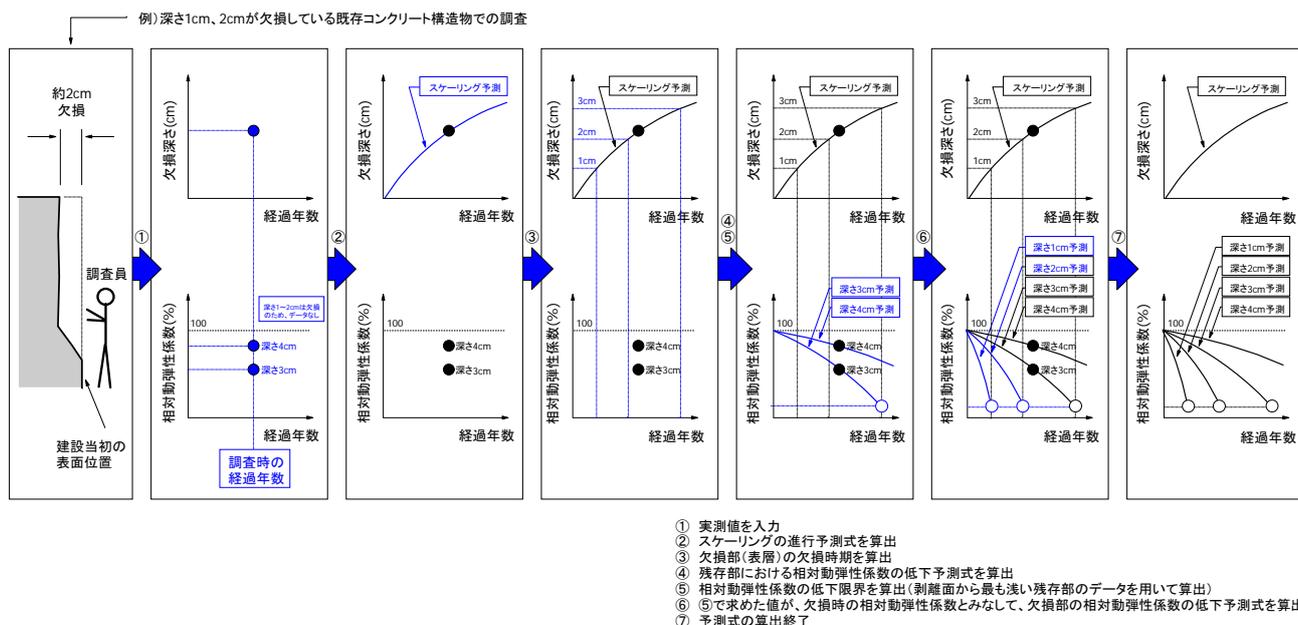


図-16 スケーリング(深さ1、2cm欠損)劣化を考慮したコンクリート構造物の相対動弾性係数予測式の算出方法

とで c 、 d を定めることができると考えられる。

ここでは、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り、これについては今後の課題としたい。

(2) 考察2：スケーリングを考慮した相対動弾性係数の予測式の算出の考え方

現地調査において、任意の供用年に実構造物の凍害の程度(スケーリング、相対動弾性係数)を調べ、その結果をもとに凍害の予測式を求める際、例えば表層が大きく欠損していた場合、欠損した表層の相対動弾性係数の低下予測式を求めることは難しい。しかし、コンクリートの耐久性評価に必要な塩化物イオン浸透性の経時変化を把握するには、欠損するまでの表層の相対動弾性係数の低下予測式も大切な情報の一つである。

そこで今回行った実験の中でスケーリングの進行が最も大きかった NP55 と BB55 の FT-D のデータを用いて、欠損した層の欠損に至るまでの相対動弾性係数の予測式の算出の考え方について考察を行う。ここでは、スケーリングの程度は深さで表現することとし、次式により求めた。

$$\frac{SC \times s}{s \times \left(\frac{D}{10}\right)} = \rho \quad \therefore D = 10 \times \frac{SC}{\rho} \quad (4)$$

ここに、 s は試験面の面積(cm^2)、 D は平均剥離深さ(mm)、 ρ はコンクリートの密度(g/cm^3)である。

図-15 は実験データを式(2)、(3)に代入して求めた凍害の進行予測を示している。平均剥離深さのグラフは式(4)を式(2)に代入して求めたものである。300 サイクルまでのグラフは実験データを回帰させたもの、300 サイクル以降のグラフ(深さ2cmの相対動弾性係数のみ)は前者の傾向が300 サイクル以降も継続すると仮定して描いたものである。NP55 は約275 サイクル、BB55 は約300 サイクル経過時に深さ1cm層が欠損に至っている。深さ1cm欠損時における深さ1cmの相対動弾性係数はNP55が73%、BB55が64%であった。スケーリングの進行の傾向が300 サイクル以降も同様と仮定した場合、深さ2cm層が欠損に至るのはNP55が424 サイクル、BB55が483 サイクルとなる。この時の深さ2cmの相対動弾性係数はNP55が73%、BB55が61%であり、深さ1cmの欠損時の相対動弾性係数に比べると同様に若干小さい値を示した。深さ1cmの相対動弾性係数が深さ2cmの値よりもやや高かったのは、凍結融解期間の長さの違い等の



図-17 調査箇所

影響によると考えられる。

ここで得た知見の範囲で、欠損した層の相対動弾性係数の予測式の算出の考え方について整理すると、以下のようになる。

例えば、深さ 1、2cm が欠損している経年した構造物において凍害調査を行うケースを考える。この場合、建設当初の表面位置から剥離面までの距離と残存している深さ 3、4cm 以降の相対動弾性係数は把握が可能であるため、図-16 の①に示すグラフを得ることができる。次に、式(2)と式(4)よりスケージングの進行予測を行うとともに、その結果をもとに深さ 1cm および 2cm が欠損した時期の推定、および深さ 3cm が欠損する時期の予測を行う。続いて、残存するコンクリートの相対動弾性係数の低下予測を式(3)により行うとともに、剥離面から最も近い深さ 3cm 欠損時における深さ 3cm の相対動弾性係数(以下、低下限界と記す)を予測する。図-15 の結果より、深さ 1cm、2cm 欠損時における深さ 1cm、2cm の相対動弾性係数は、低下限界よりもやや高いもしくは同程度の値になると推定される。そこで、安全側の評価を行うため、欠損部における欠損時期の相対動弾性係数を前述の低下限界の値とすると、欠損部の相対動弾性係数の予測式が求まり、最終的に図-16 の右に示す予測結果を得ることができる。今後は、ここで示した考え方の照査を、欠損深さが比較的大きい構造物での凍害の調査において実証していく予定である。

3. 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に関する調査

北海道の道路コンクリート構造物は、凍結融解と凍結防止剤の複合作用を受けやすい厳しい環境下に曝されて

表-3 調査対象橋梁諸元

路線	橋梁名	架設年度	橋長 (m)	凍害危険度	累積散布イオン量 Cl ⁻ (kg/m)	剥離深さ (mm)
R242	1-1 橋	S51	152	5	60.8	15.1
	1-2 橋	S42	15		48.9	2.1
	1-3 橋	S34	60		41.6	0.9
	1-4 橋	S42	51		7.1	3.1
	1-5 橋	S32	25		12.2	14.1
	1-6 橋	S39	14		28.7	2.4
R274	2-1 橋	S48	85	4	93.9	13.0
	2-2 橋	S60	121		93.9	5.8
	2-3 橋	S59	135		93.9	30.3
	2-4 橋	S45	40		113.0	8.4
	2-5 橋	S48	62		320.3	5.4
	2-6 橋	S57	58		366.9	10.0
R230	3-1 橋	S43	110	3	1118.4	10.3
	3-2 橋	H8	214		650.0	4.8
	3-3 橋	S57	55		698.5	5.4
	3-4 橋	S42	25		336.6	1.1
R453	4-1 橋	S61	230	3	480.8	5.2
	4-2 橋	S42	38		138.4	0.8
	4-3 橋	S39	25		438.8	5.9
	4-4 橋	S49	41		261.4	9.3

いる。この複合作用に起因する劣化が構造物の安全性や寿命、ライフサイクルコスト等に及ぼす影響を適切に評価するための合理的な技術を構築するには、実環境下での劣化の進行性を把握することも大切である。そこで、凍結融解と凍結防止剤の複合作用を受ける北海道山間部に位置する道路橋を対象に塩化物イオン等の調査を行った。

3.1 調査概要

3.1.1 調査橋の選定

図-17に調査箇所を示す。図中に示す凍害危険度は、長谷川が¹⁰⁾全国の気象官署の資料をもとに、我が国におけるコンクリートの凍害の危険性を地域ごとに1~5の5段階で表したものである。数値が大きいほど凍害の予想程度が大きいことを表しており、凍結融解作用の厳しさの目安となる。今回選定した一般国道242号(以下、R242と記す)の凍害危険度は5(きわめて大きい)、一般国道274号(以下、R274と記す)は4(大きい)、一般国道230号(以下、R230と記す)及び一般国道453号(以下、R453と記す)は3(やや大きい)に該当する。はじめに、これらの路線に架かる橋梁の中から、立ち入り調査が可能な橋梁を計94橋(R242: 34橋、R274: 25橋、R230: 24橋、R453: 11橋)選定し、その中から外見上、凍害の程度が大きかった20橋(R242: 6橋、R274: 6橋、R230: 4橋、R453: 4橋)を抽出した。表-3に抽出した橋梁の諸元と対応する凍害危険度および各橋梁で散布された凍結防止剤の推定累積量から求めた橋長1mあたりの累積散布塩化物イオン量(以下、累積散布イオン量と記す)の推定値を示す。北海道の一般国道では、スパイクタイヤの使

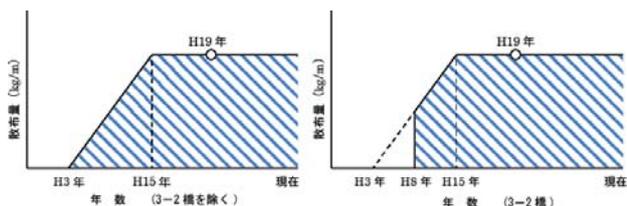


図-18 凍結防止剤の推定累積量の求め方 (H1は平成の略)

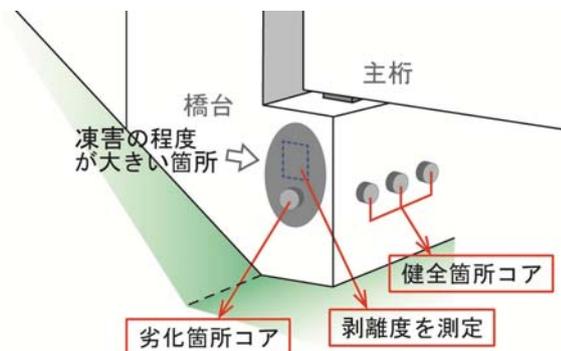


図-19 調査の概念図

用規制前は凍結防止剤がほとんど使用されていなかった。しかしスパイクタイヤの使用が規制されて以降、非常に滑りやすい路面が頻出したことを受け、道路管理者は凍結防止剤の散布による雪氷路面対策を行い始めた。その後、凍結防止剤散布量は平成3年から平成15年にかけてほぼ一定の割合で増加し、平成15年以降は同程度の散布量で推移している¹¹⁾。このことをふまえて、凍結防止剤の累積量は平成19年に調査された各路線の詳細な散布量のデータを使用して図-18に示すグラフを作成し、斜線部の面積を算出することで求めた。そして、求めた値を塩化物イオン量に換算することで、供用から現在に至るまでの大凡の累積散布イオン量を求めた。

3.1.2 調査内容

図-19に調査の概念図を示す。調査部位は、路面から流れ落ちてくる凍結防止剤を含む融雪水の影響を受けやすい橋台とした。はじめに橋台を全体的に見渡し、外見上、凍害の程度が大きい箇所を選定してφ10×6cmのコアを採取した。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までの範囲を1cm間隔にスライスし、JIS A 1154 (硝酸銀滴定法) に準じて各スライス片に含まれる全塩化物イオン量 (以下、塩化物イオン量と記す) を測定した。あわせて塩化物イオンの浸透に及ぼす凍害(スケーリング、ひび割れ)の影響を調べるため、剥離度¹²⁾ならびに内部の相対動弾性係数も調べた。

図-20に剥離度の測定要領を示す。はじめに調査対象面に

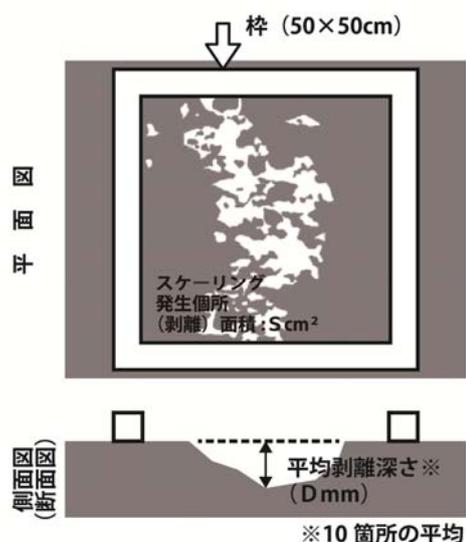


図-20 剥離度の測定要領

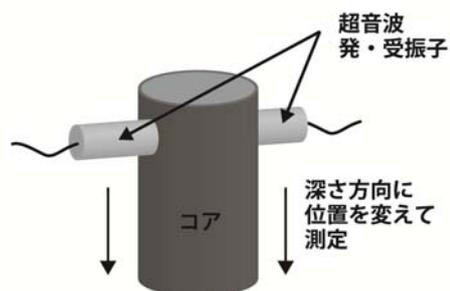


図-21 相対動弾性係数の測定方法

50×50cmの枠を据え付け、枠内におけるスケーリング発生箇所をチョークで明示し、デジタルカメラで撮影して画像処理を行い、剥離面積を求めた。次にノギスを用いて剥離深さを枠内で10点測定し、平均剥離深さを求めた。そして式(5)、(6)より剥離度を求めた。

$$D_m = D \times A_s \quad (5)$$

$$A_s = \frac{S}{50 \times 50} \quad (6)$$

ここに、 D_m は剥離度(mm)、 A_s は枠内におけるスケーリング面積の割合、 S は枠内におけるスケーリング発生箇所の面積(cm^2)である。

図-21に相対動弾性係数の測定方法を示す。凍害の程度が外見上大きい箇所から採取したコア(図-19の「劣化箇

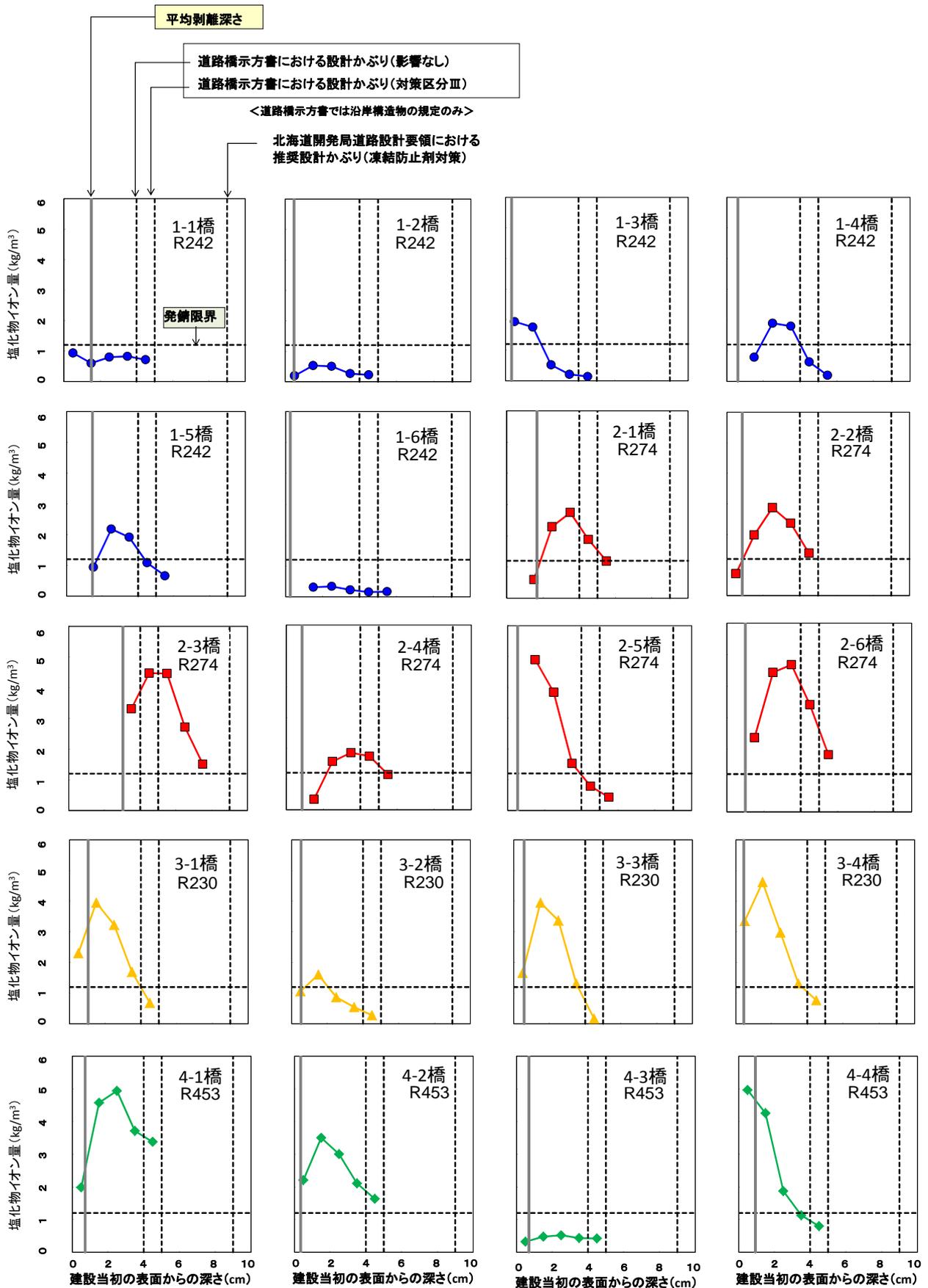


図-22 塩化物イオン量の測定結果

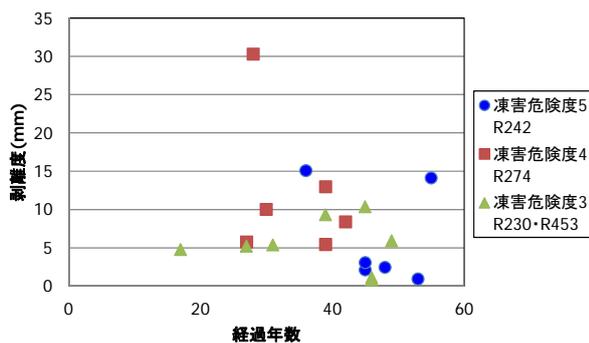


図-23 調査実施時における経過年数と剥離度の関係

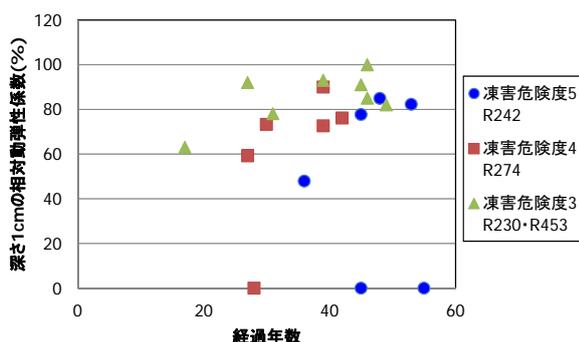


図-24 調査実施時における経過年数と深さ1cmの相対動弾性係数の関係(欠損している橋台は0としている)

所コア)の両側面に超音波の発・受振子をあて、剥離面から深さ1、2、3、4、5cm位置の超音波伝播速度を測定し、2章で示した式(1)より相対動弾性係数を求めた。なお、式(1)の E_{d0} は外見上健全な箇所から $\phi 10 \times 30 \sim 35$ cmのコア(図-19の「健全箇所コア」)を採取し、その最深部で求めた超音波伝播速度と「劣化箇所コア」の各深さの超音波伝播速度の中で最も大きな値を式(1)に代入して得られる E_d を E_{d0} とすることとした。

3.2 調査結果・考察

3.2.1 コンクリートの塩化物イオン量

図-22に塩化物イオン量の測定結果を示す(なお、1-1～1-6橋、2-1～2-6橋のグラフは平成24年度の報告書にも掲載したものであるが、調査箇所全体の傾向を説明する必要性に鑑みて、本報にも掲載した)。一部のグラフでは平均剥離深さよりも浅い範囲にデータがプロットされているが、これはコンクリートが部分的に残存していたため、測定を行ったものである。

剥離面から深さ5cmまでの範囲における塩化物イオン量は、全体的に見るとR242が他の路線より小さく、表-3で推定した累積散布イオン量と対応する結果が示された。

1-1橋、1-3橋、2-5橋、4-4橋以外の橋梁で表面側の塩化物イオン量が減少している傾向が見られるが、これは、中性化による移動濃縮や表面の劣化によるコンクリート組織の粗大化に伴う雨水などによる流失の影響で剥離面近傍の塩化物イオン量が減少した¹³⁾、¹⁴⁾ことが考えられる。

次に、かぶり位置の塩化物イオン量について考察する。今回調査した山間部の道路橋は、平成8年に架設されたR230の3-2橋を除いてスパイクタイヤ規制前に施工された橋梁で、道路橋示方書¹⁵⁾では塩害に対して基本的に「影響なし」もしくは「対策区分Ⅲ」のエリアに分類され、これに相当する設計かぶりは前者が4cm、後者は5cmとされている。塩化物イオンの鋼材腐食発生限界濃度(以下、発錆限界と記す)については、使用材料や配合を考慮して実測結果や試験結果などを参考に定めることが望ましい旨が2012年改訂のコンクリート標準示方書¹⁶⁾に記載されているが、今回調査した橋梁については材料諸元が得られなかった理由により、安全側の設計値(最小値)1.2kg/m³として考察を展開する。これらの条件をグラフに書き入れると、R242は概ね発錆限界を下回っているのに対し、他の3路線は全体的に発錆限界と概ね同値もしくは上回っていることが読み取れる。なお、平成22年以降の北海道開発局の道路設計要領¹⁷⁾では、凍結防止剤による塩害の対策として基本的に道路橋示方書の「対策区分Ⅰ」相当の対応を行うこととされている。参考までにその設計かぶり(9cm)をグラフに書き入れると、塩化物イオンの濃度勾配が緩やかなR453の4-1橋はさらに詳細な調査を要すると思われるが、それ以外は発錆限界に到達している可能性は小さいと推察される。累積散布イオン量が比較的多いR230(表-3)はいずれも発錆限界に達しておらず、現段階では安全側の設計がなされていると言える。

3.2.2 コンクリートの凍害の発生状況

図-23に各道路橋の経過年数と剥離度の関係を示す。凍害危険度が5である一方で累積散布イオン量が少ないR242は全体的に剥離度が小さい傾向を示した。累積散布イオン量がR242よりも多い凍害危険度が3のR230・453と凍害危険度が4のR274を比較すると、累積散布イオン量は凍害危険度が3のR230・453の方が多いものの、剥離度については凍害危険度が4のR274の方が同等もしくはやや大きい結果となっており、これについては凍害危険度が剥離度に影響を及ぼしている傾向が示された。図-24は調査実施時における経過年数と竣工当時の表面から深さ1cmの相対動弾性係数の関係を示している。なお、深さ1cmが欠損している橋台については0に表示している。

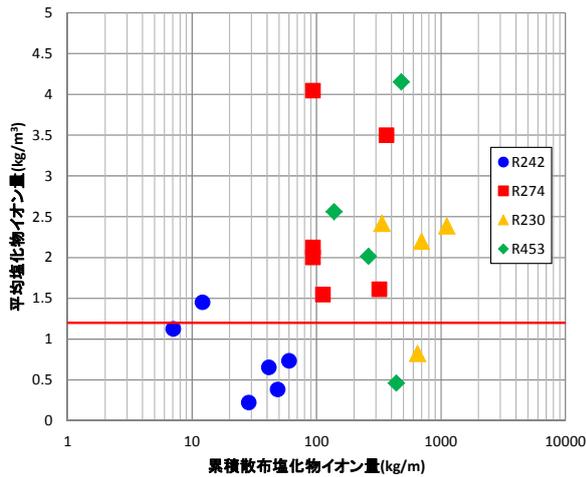


図-25 累積イオン量と平均塩化物イオン量

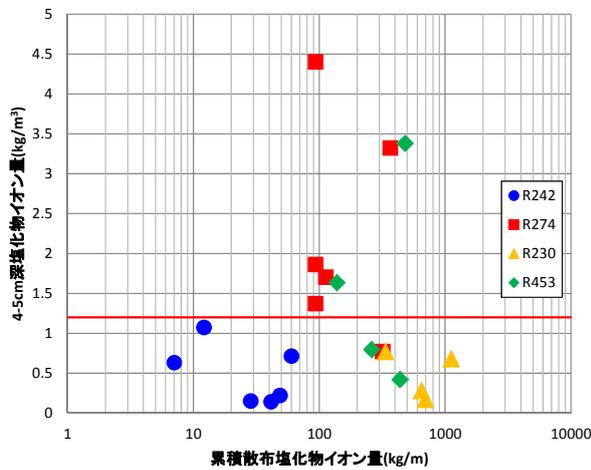


図-26 累積散布イオン量とかぶり位置(深さ4~5cm間)における塩化物イオン量

累積散布イオン量が多い凍害危険度3のR230・453の道路橋の橋台の多くは80%以上の値を示していた。一方、凍害危険度が4および5のR274ならびにR242については、前者に比べると相対動弾性係数は小さく、凍害危険度の影響が見受けられる結果となった。

3.2.3 塩化物イオンの浸透に及ぼす散布量の影響

表-3で示した累積散布イオン量と、雨水による流出等の影響が見受けられた深さ1cmのデータを除外して求めた深さ2~5cm間における塩化物イオン量(以下、平均塩化物イオン量と記す)の関係を図-25に示す。全体的に累積散布イオン量が多いほど塩化物イオン量は大きい傾向が見受けられた。一方、図-26は累積散布イオン量と道路橋示方書における設計かぶりに相当する深さ4~5cmにおける塩化物イオン量(以下、4.5cm深塩化物イ

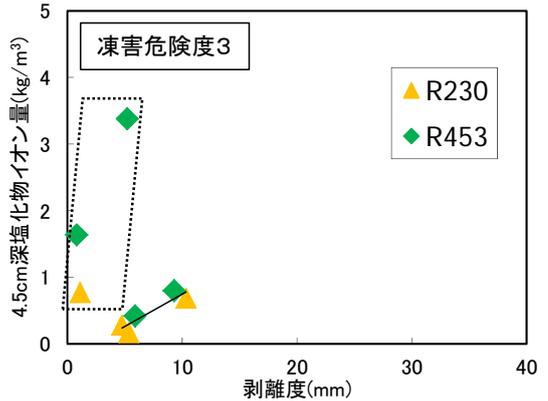
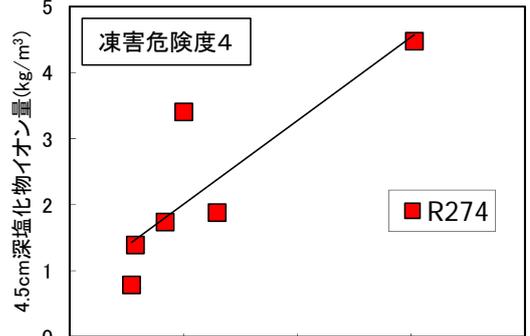
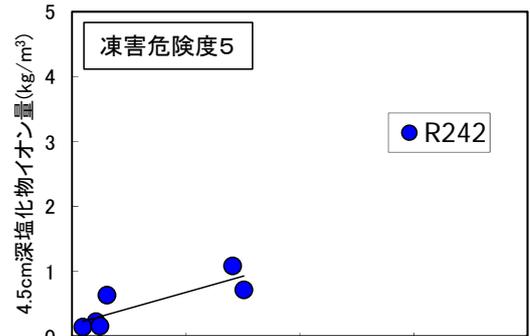


図-27 剥離度と4.5cm深塩化物イオン量の関係

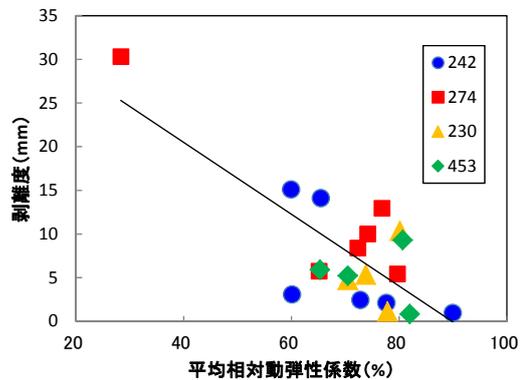


図-28 平均相対動弾性係数と剥離度

オン量と記す)の関係を整理したものである。凍結防止剤の散布量と設計かぶり位置における塩化物イオン量は

必ずしも対応していないことが確認された。

3.2.4 塩化物イオンの浸透に及ぼす凍害の影響

図-27 は剥離度と 4.5cm 深塩化物イオン量との関係を示している。全体的にみると、4.5cm 深塩化物イオン量は剥離度が大きいほど多い傾向が見受けられた。なお、凍害危険度 3 の破線で括られている橋台（3-4 橋、4-1 橋、4-2 橋）においては、同じ凍害危険度 3 の他の橋台のデータとは対応せず、剥離度が数ミリ程度でも塩化物イオン量が大きく表示される特異な傾向を示した。図-28 は橋台竣工当初の面から深さ 1~5cm 間における相対動弾性係数（剥離した深さ位置の相対動弾性係数は 0 とした）の平均値（以下、平均相対動弾性係数と記す）と剥離度の関係を示している。ばらつきはあるが、本調査の範囲では剥離度の増加に対応して、平均相対動弾性係数は減少する傾向が示された。設計かぶり位置における塩化物イオン量の予測・評価に際しては、凍結防止剤の散布量だけではなく、剥離によるかぶりの減少速度や塩化物イオンの浸透促進の一因にもなる凍害ひび割れの進展具合も考慮する必要があると言える。図-27 で凍害危険度 3 の破線で括ったデータに関しては、凍害の影響に加えて、コンクリートの炭酸化に起因する塩化物イオンの移動・濃縮¹³⁾などが影響した可能性が疑われるものの、本年度の研究では明確な原因の特定には至らなかった。

4. まとめ

平成 25 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、(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、(2)塩化物イオンの浸透性への影響の評価、(3)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、の 3 項目を行った。(1)、(2)については、夏季に受ける乾燥・乾湿の影響に着目し、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。(3)については、凍結融解と凍結防止剤の複合作用を受ける北海道山間部に位置する道路橋を対象に調査を行った。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。

- (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、相対動弾性係数は、長さ変化率の最大振幅に応じて予測式の指数値 $c \cdot cy^d$ を適

切に定め、 c の自然対数と d の関係式を用いて c 、 d を求めることにより予測を行うことができる。

- (3) 橋台コンクリートの劣化箇所に浸透している塩化物イオン量は、凍結防止剤累積散布量の推定値と概ね比例傾向にある。
- (4) 4.5cm 深塩化物イオン量は、剥離度が大きいほど多い。凍害によるかぶりの減少およびひび割れの進展が塩化物イオンの浸透性に影響を及ぼすことが確認された。

5. 今後の課題

平成 26 年度以降は、脱スパイクタイヤ以前に建設された橋台など凍結防止剤散布開始前に凍害単劣化を先行的に受けているケースを考慮した予測技術および予測の精度に及ぼす初期欠陥（温度クラックなど）の影響についての検討を行う予定である。また、道路橋下部での調査を継続してデータの蓄積を図るとともに、データ解析を行って実験式を補正した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を進め、さらには、評価法の体系化に向けての検討を行っていく予定である。

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

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

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, 2007.9
- 10) 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, Vol.29, pp.248-253, 1975.
- 11) 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, 日本コンクリート工学協会, 2008.8
- 12) 北海道開発局港湾部港湾建設課, 寒地港湾技術センター: 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
- 13) 小尾稔, 田口史雄:凍結融解作用を受ける海岸コンクリート構造物の塩分量調査, 第 47 回北海道開発局技術研究発表会論文概要集, 道路・舗装部門, pp.199-204, 2004.2
- 14) 文献 7), pp.34-36
- 15) 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
- 16) 土木学会:2012 年制定コンクリート標準示方書「設計編」, pp.148-151, 2012.12
- 17) 平成 25 年度北海道開発局道路設計要領: p.3 コ 7-5

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

Budget : 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 : TAGUCHI Fumio, SHIMATA Akinori, MIHARA Norihiro
ENDO H Hirotake, TABATA Kohtaroh,
KAWAMURA Kohji, KASAI Takahiro, WATANABE Jun,
SUZUKI Satoshi

Abstract : Toward formulating suggestions for methods of evaluating concrete performance when frost damage is in two or more forms, three sets of evaluations were done in FY2013. They were (1) evaluation of the progress of frost damage on concrete with scaling and cracking, (2) evaluation of the influence of chloride ion penetration and (3) evaluation of the progress of frost damage and penetration of chloride ions for actual structures. For (1) and (2), the influence of dry or dry-wet action in summer on progress of frost damage (scaling and cracks) and chloride ion permeability of concrete were done. For (3), in the investigation of actual structures, we continued examinations that had been conducted in a mountainous area in Hokkaido in the previous year: We measured the degree of concrete scaling from the surface of the bridge abutment, and we took a core sample and measured the relative dynamic modulus of elasticity and the concentration of chloride ion. Our findings revealed that freeze-thaw expansion and shrinkage, as well as dry-wet, are closely related to the progress of frost damage caused by saltwater and freeze-thaw action. Also, it was found that the chloride ion concentration at sites where the concrete covers reinforcements is closely related not only the volume of deicing salt application but also the degree of concrete frost damage.

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