

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、遠藤裕丈、田畑浩太郎、
川村浩二、宮本修司、佐藤博知、中村直久、
葛西隆廣

【要旨】

凍害の各劣化形態を複合的に受けたコンクリートの性能評価法の提案に向け、平成 24 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の開発のため、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、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、の 3 つを目的に、(1)と(2)はセメントの種類（普通ポルトランド、高炉セメント B 種）ならびに凍結速度に着目した実験、(3)は前年度の目視調査のうち気象条件が厳しい北海道山間部に位置する道路橋で、凍害劣化が大きいと判断される橋台を選定し、剥離度測定やコア採取による相対動弾性係数の推定や塩化物イオン量の詳細調査を行った。その結果、室内実験からは、スケーリング量は部分的な角欠けが発生するまでの間は、普通ポルトランドよりも高炉 B 種の方が大きい傾向を示したものの、相対動弾性係数に及ぼすセメントの種類の影響は明確に表れなかった。凍結速度が減少するとスケーリングは発生するものの、スケーリング量は大きく減少すること、また、相対動弾性係数は殆ど低下しなくなる結果が得られた。また、スケーリング量予測や相対動弾性係数予測に関して簡易なモデル式の活用が可能であることや、塩化物イオンの浸透性は差分法で比較的精度良く表現できる結果を得た。さらに、構造物調査ではスケーリングによる剥離が凍結防止剤の散布量の影響を受けていたが、相対動弾性係数は全体的に概ね 60～80%以上で、凍結防止剤の影響はさほど見られなかった。なお、コンクリートに浸透した塩化物イオン量は凍結防止剤の散布量（多・少）と概ね対応していた。

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図るためには、合理的な耐久性設計と適切な維持管理が重要である。このため、耐久性設計にあたっては、実態の劣化状況に即した劣化予測が大切であり、そのための予測方法の充実・整備が必要である。

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⁾の単一の劣化形態の進行を前提としている。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), 2)}。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・進行する場合が殆どで単独劣化より厳しい状況にある。さらに、塩化物イオンの供給も同時に起こるため、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耐久性設計に求められる。

本研究では、凍害形態として同時に多く発生しているスケーリングとひび割れが複合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、実験ならびに構造物調査を行っている。平成 24 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のため、(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室内実験（使用セメントの影響）

凍害の進行性の評価および塩化物イオンの浸透性評価のため、図-1 に示す凍結融解試験と塩水浸漬試験を行った。

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45、55、65%の3水準、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）とした。なお、寒冷地で耐凍害性を向上させるため一般的に使用されている配合設計にあわせてAE減水剤を使用し、目標空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ に設定した。細骨材は苫小牧錦岡産の海砂（表乾密度 2.67g/cm^3 、絶乾密度 2.65g/cm^3 、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^3 、絶乾密度 2.62g/cm^3 、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：B、普通ポルト：N）と水セメント比（45、55、65）を組み合わせた記号を付けた。

2.2 供試体

供試体作製（ $10 \times 10 \times 40\text{cm}$ ）を図-1に示す手順で行った。なお、養生は材齢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（28日の圧縮強度は表-1に併記）。ここでは構造物の状態にあわせて一面からのみ試験水を供給する環境作用を与えることとした。また、対象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（ $10 \times 40\text{cm}$ ）とした。打設面以外の5面にシラン系表面含浸材を塗布して防水処理を施し、さらに冷氣伝達面を打設面に限定するため、断熱性を有するスチレンボードを用いてボックスを作製し、その中に作製したコンクリートを組み込んだ。

2.3 実験方法

図-1 に示す実験の流れに基づき、供試体作製後、材齢28日から凍結融解試験ならびに比較のための凍結融解を与えない塩水浸漬試験を開始した。実験の様子を写真-1に示す。試験水は濃度3%の塩化ナトリウム水溶液（以下、塩水と記す）を用いた。凍結融解試験はJIS A 1148を準用し、供試体を3mm厚の塩水で覆うことができるサイズのゴム製の容器に供試体を挿入し、塩水を容器に注いだ後、容器を試験槽に格納して $-18^\circ\text{C} \sim 5^\circ\text{C}$ の範囲で

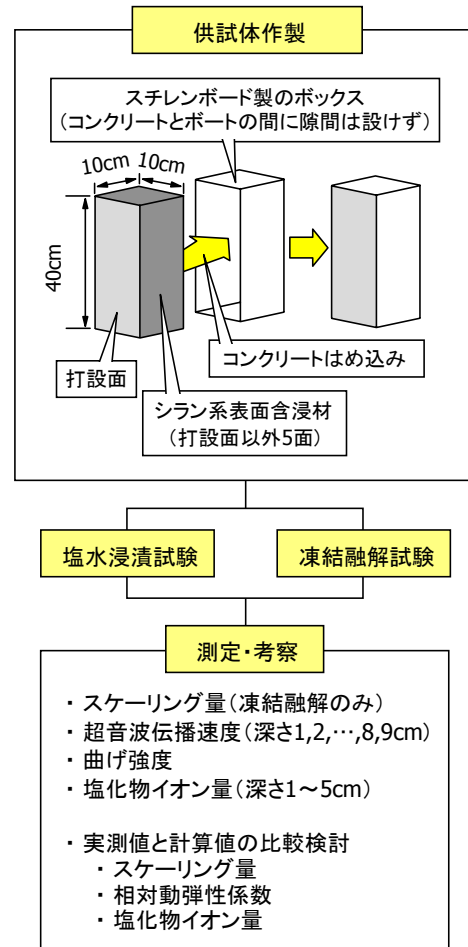


図-1 実験の流れ

表-1 コンクリート配合および圧縮強度

記号	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				強度 (MPa)
		W	C	S	G	
B45	45	145	322	808	1073	41.1
B55	55	147	267	865	1059	19.2
B65	65	149	229	917	1035	16.4
N45	45	144	320	815	1082	46.8
N55	55	146	265	871	1065	35.4
N65	65	148	228	922	1041	27.4

目標空気量はいずれも $4.5 \pm 1.5\%$

1 サイクル3~4時間の凍結融解作用を与えた。一般的な凍結融解試験のサイクルは300サイクルであるが、ここでは長期的な劣化挙動を把握するため、600サイクルまで行った。途中、約36サイクルおきにスケーリング量を、また、ひび割れの進行は相対動弾性係数で評価するとともに、100、200、300、400、500、600サイクルにおいて相対動弾性係数と塩化物イオン量、そして、試験終了時の600サイクルに劣化に伴う力学特性把握のためのJIS A 1106に準じた曲げ強度の測定を行った。スケーリング量は、容器の中から剥離片を採取し、 110°C で乾燥させた後、



写真-1 凍結融解試験および塩水浸漬試験の状況

剥離片の質量を測定して求めた。相対動弾性係数は、周波数が 28KHz の超音波測定器を用いて透過法により深さ 1、2、…、8、9cm の超音波伝播速度を測定し、既往の式(1)³⁾よりそれぞれの深さ位置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)の測定値が与えられる。ここでは実験結果に及ぼすセメントの水和の進行による影響を極力排除する理由から、凍結融解試験と同じ期間だけ塩水に浸漬させた供試体の動弾性係数をもって 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。コンクリートカッターを使用して深さ 0～5cm の範囲を 1cm 間隔でスライスし、深さ 0～1cm、1～2cm、2～3cm、3～4cm、4～5cm 間の全塩化物イオン量を測定した。なお、凍結融解を与えた供試体は試験面の損傷が大きいため、切断する位置は底面を基準に求めた(例えば、表層 0～1cm の試料は、底面からの距離が 9cm の位置を切断することで採取する、と考える)。比較対象である塩水浸漬試験の測定は凍結融解試験の期間に

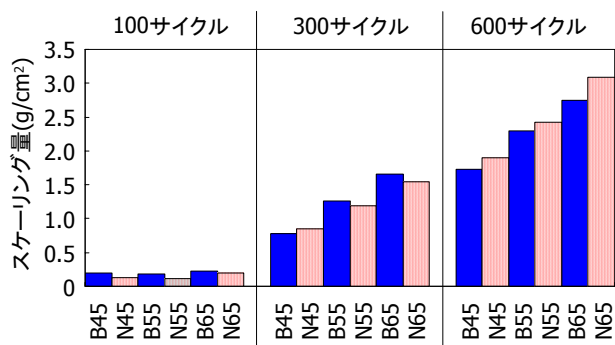


図-2 100、300、600サイクルのスケーリング量

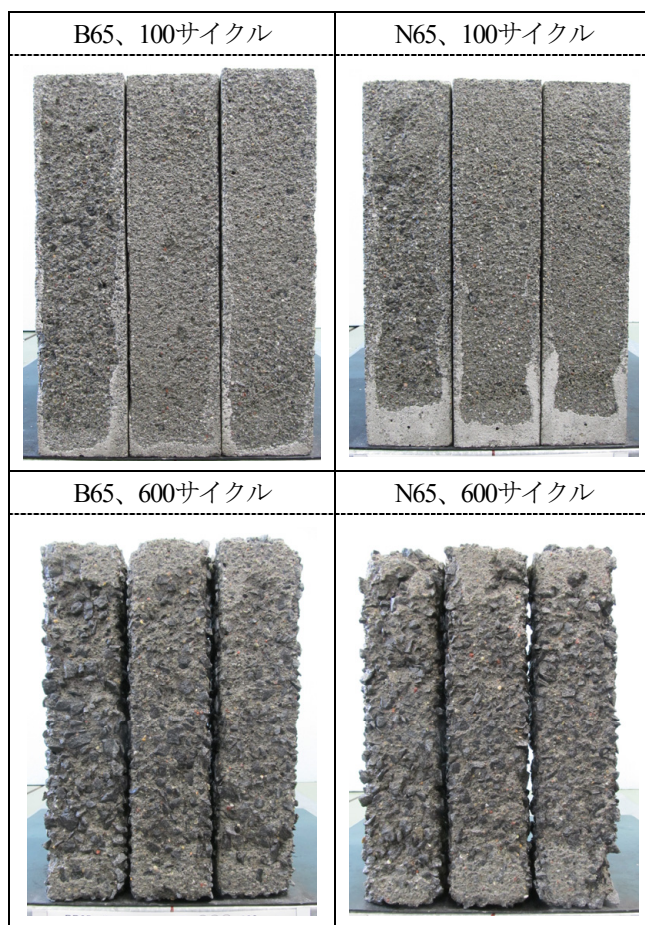


写真-2 スケーリングの状況の一例

あわせて、浸漬 17、34、50、67、84、100 日経過時(それぞれ凍結融解 100、200、300、400、500、600 サイクルに相当する日数)に行った。

2.4 実験結果・考察

2.4.1 凍結融解作用を与えた供試体の損傷状況

図-2 に 100、300、600 サイクルのスケーリング量(各サイクルまでの累積値)、写真-2 に代表して 100、600 サイクルにおける B65、N65 のスケーリングの状況を示す。スケーリング量は水セメント比が大きいほど多く、水セ

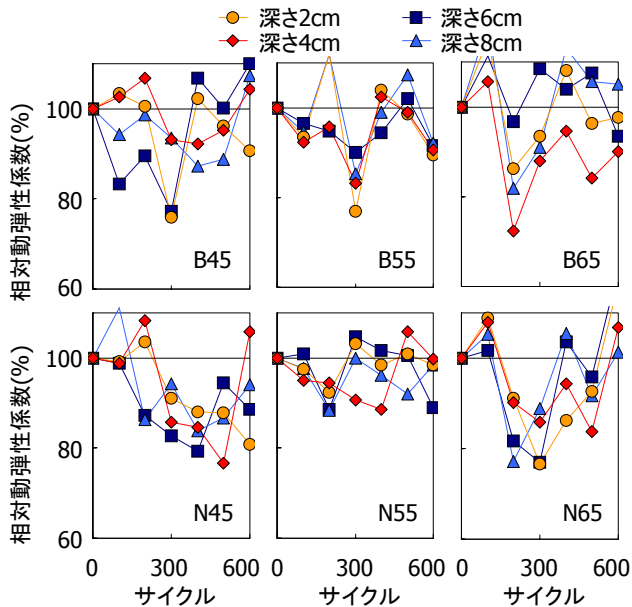


図-3 相対動弾性係数の測定結果（深さ2、4、6、8cm）

メント比と密接な関係にある結果が示された。セメントの種類に着目すると、薄皮状の剥離の発生が主な100サイクルおよび300サイクルのスケーリング量は全体的に高炉B種の方が多い結果を示した。この傾向は、既往の研究⁴⁾と対応している。今回の実験では、さらに長期的な劣化挙動把握のため600サイクルまで試験を実施したが、劣化が進行し、粗骨材が露出するほど大きく損傷し、部分的に角欠けが発生している600サイクルのスケーリング量は、普通ポルトの方が多かった結果となった。

一方、図-3に相対動弾性係数の測定結果を示す。相対動弾性係数は全体的に80%程度以上で、耐凍害性能を概ね満足する値⁵⁾を示した。また、スケーリングとは対照的に、残存しているコンクリートの相対動弾性係数に及ぼす配合の違いの影響もさほど見られなかった。深さの違いによる差も殆ど示されなかった。供試体の作製に使用したAE減水剤によって混入されるエントレインドエアは凍結行程で発生する未凍結水の移動による水圧を緩和させる機能を有することが知られており⁶⁾、AE減水剤の効果が卓越したことが考えられる。なお、一部において相対動弾性係数が途中で上昇する形の結果が示された。この要因として、水和の影響の排除に極力努めたものの影響が少なからず表れたこと、また、スケーリングによる脆弱な組織の欠損により、超音波の伝播経路がその直下面に残存する硬質な組織に変わったことで、見かけの伝播速度が上昇したことが考えられるため、今後更に検討を加えていく。

図-4に600サイクル終了後の曲げ強度の結果を示す。凍

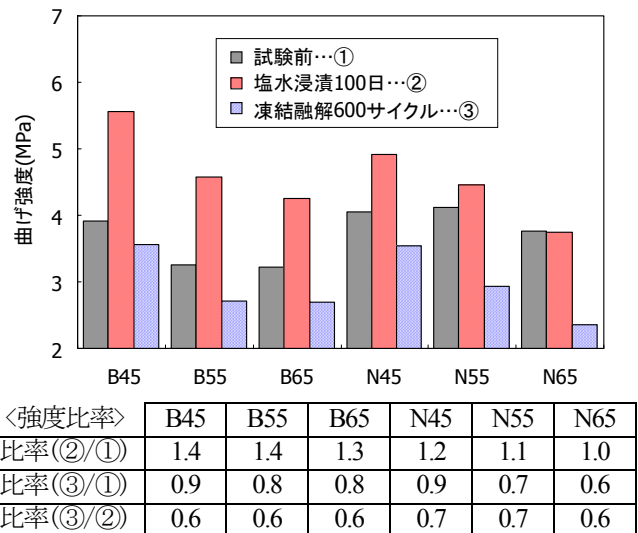


図-4 曲げ強度の測定結果および強度比率

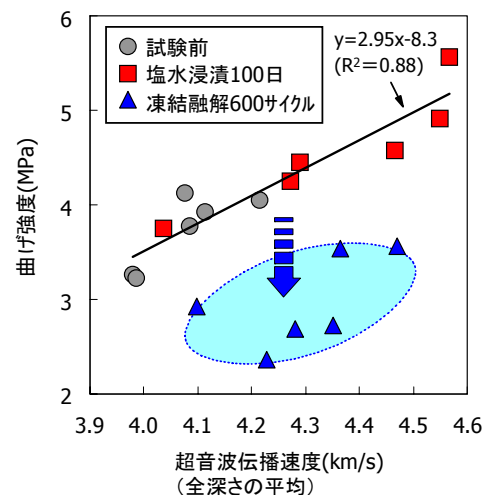
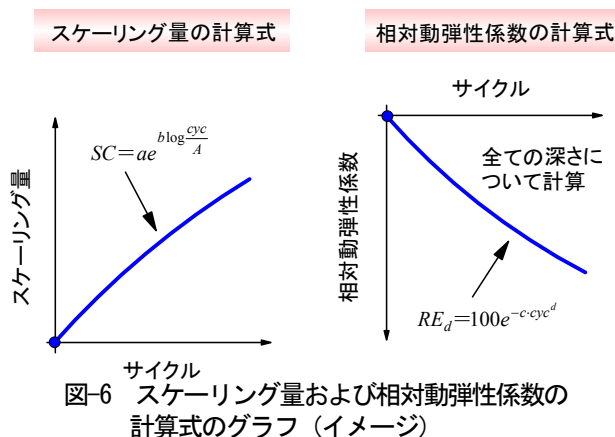


図-5 超音波伝播速度（全深さの平均）と曲げ強度の関係

結融解試験と同じ期間、塩水に浸漬させた場合は水和の進行により、試験前に比べると最大1.4倍増進した。この傾向は高炉B種を用いたシリーズで顕著に表れていた。一方で、凍害が発生した場合はいずれのケースも強度は大きく低下している。図-5は超音波伝播速度（深さ1、2、…、8、9cmの全ての測定値の平均）と曲げ強度の関係を示している。凍結融解を受けておらず、コンクリートの品質が均等に健全なもの（試験前、塩水浸漬）については良い相関を示した。これは曲げ強度と水和反応の進行が密接な関係にあることを表す。しかし、凍結融解を受けたものは回帰線から大きく逸脱し、曲げ強度が低下しており、凍害による損傷は曲げ強度に大きな影響を及ぼすことが確認された。本年度の研究の範囲においては、相対動弾性係数が80%程度まで低下すると曲げ強度比は試験前の0.6～0.9倍となる結果が得られた。凍結融解試



験前後の曲げ強度の比率 (③/①) は水セメント比とほぼ反比例している。また、水セメント比が大きいくほどスケールングが大きい (図-2)。これらのことから、水セメント比はスケールングによる断面欠損の程度や曲げ強度の低下に影響を及ぼしていると考えられる。

2.4.2 凍害の進行予測に関する考察

現在、コンクリート標準示方書では凍害の劣化予測式が示されていないが、幾つかのモデル式が提案されている。ここでは簡易なモデルを利用してスケールングを予測する寒地土木研究所の既往研究に基づく式(2)⁷および他研究の相対動弾性係数の予測を淡水の場合で行う式(3)⁸を塩水条件下で用いる方法により評価を試みた。

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

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

ここに SC はスケールング量 (g/cm^2)、 RE_d は相対動弾性係数 (%), 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、試験期間の中間をとって 300 とした)、 a, b, c, d は配合や環境などの諸条件によって定まる係数である。

スケールング量の実験による実測値と式(2)から求めた計算値との比較を図-7、相対動弾性係数の実験による実測値と式(3)から求めた計算値との比較を図-8に示す。スケールング量は、実測値と計算値が良く対応した。相対動弾性係数は、実測値がばらばらについているが、 $y=x$ の直線の近傍にほぼ沿ってプロットされ、淡水の評価式である式(3)は塩水の場合も利用できることが示された。これらの室内実験値と提案式の計算値の比較により、凍結融解と凍結防止剤等の塩化物の複合作用を受けた場合の凍害劣化曲線として基本的に式(2)、式(3)を併用することで

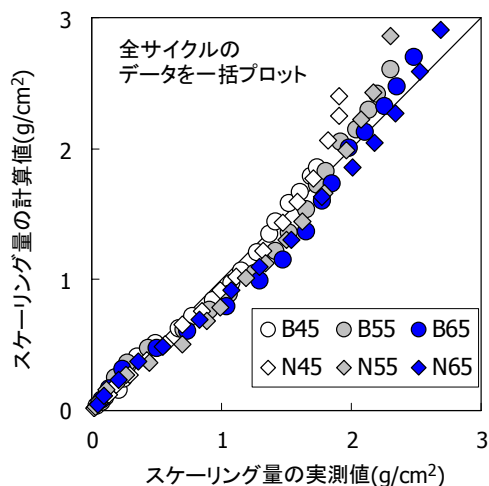


図-7 スケールング量の実測値と計算値の比較

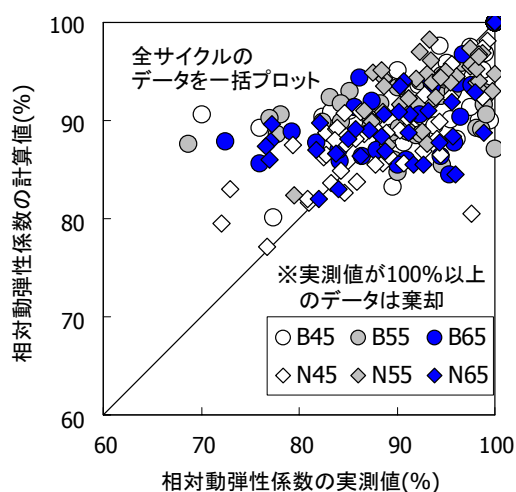


図-8 相対動弾性係数の実測値と計算値の比較

得ることが可能であると考えられる。なお、今回の実験は供用開始時から凍結防止剤が散布されるような、環境条件が建設当初から変わらないことを前提としているが、凍結防止剤散布が頻繁に行われるようになったのはスパイクタイヤの規制が行われた約 20 年前以降であるため、今後、供用途中から凍結防止剤の散布が開始されたような供用年数が長い構造物への予測式の適用性も検証していく予定である。

2.4.3 塩化物イオンの浸透状況

図-9に代表して凍結融解600サイクルおよび比較のため同じ期間だけ塩水に浸漬させた供試体 (浸漬期間は 100 日) の塩化物イオン量の分布を示す。ここでは、深さ 0~1cm の値は中間の 0.5cm、深さ 1~2cm は中間の 1.5cm、深さ 2~3cm は中間の 2.5cm、深さ 3~4cm は中間の 3.5cm、深さ 4~5cm は中間の 4.5cm にデータをプロットした。深さ 0~1cm では、塩化物イオンの浸透に及ぼす凍害の影響の傾向は明確に表れなかった。しかし、

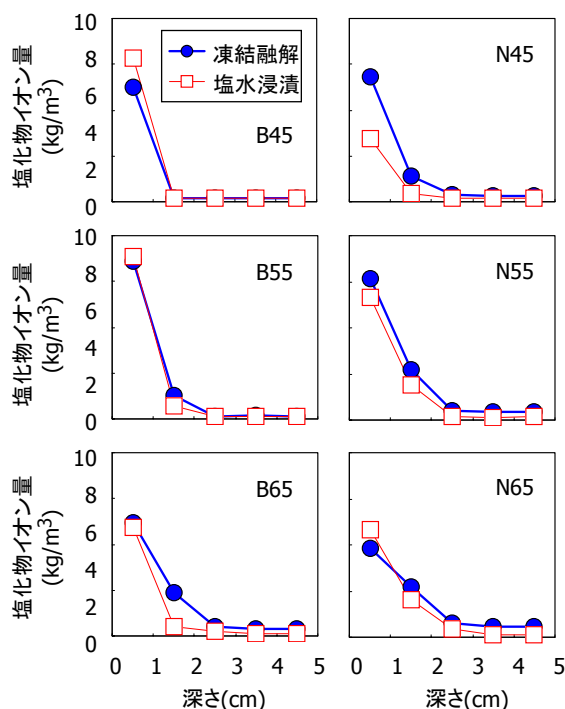


図-9 塩化物イオン量の測定結果
(凍結融解600サイクル、塩水浸漬100日)

深さ 1～2cm では、B45 を除くと凍結融解を与えた方が塩化物イオン量は多く、また、セメントの種類で見比べると、塩化物イオンは普通ポルトを用いた方が多く浸透していた。深さ 2～5cm では、B65、N45、N55、N65 において凍結融解を与えた方が塩化物イオンは多い傾向がみられ、普通ポルトの場合、塩化物イオンの浸透に及ぼす凍害の影響が顕著に表れやすい結果が示された。

図-10 に凍害の影響が確認された深さ 1～5cm における塩水浸漬試験と凍結融解試験による供試体の塩化物イオン量の比較を示す。凡例の B は高炉 B 種を用いたシリーズ (B45、B55、B65)、N は普通ポルトを用いたシリーズ (N45、N55、N65) を表している (後の図-12、13、15 も同じ)。塩水浸漬に比べて凍結融解を与えた方が塩化物イオン量は多く、塩化物イオンの浸透量は試験期間 (サイクル) 全体を通じて凍害の影響を大きく受けていることが確認された。相対動弾性係数は全体的に 80%以上の値を示す (図-3) もの、スケーリングが最大 $1.7 \sim 3.1 \text{ g/cm}^2$ 発生していた (図-2)。なお、今回の凍結融解試験における深さ 1～2cm、2～3cm、3～4cm、4～5cm の塩化物イオン量は、塩水浸漬試験の値に比べるとそれぞれ平均 3.3 倍、1.9 倍、1.6 倍、1.3 倍大きく、(図-9 より) 深さ 0～1cm 以外の表面に近いほど多く存在する傾向が示された。塩化物イオンの浸透性に及ぼす凍害による組織の損傷・多孔化の影響は大きいと言える。

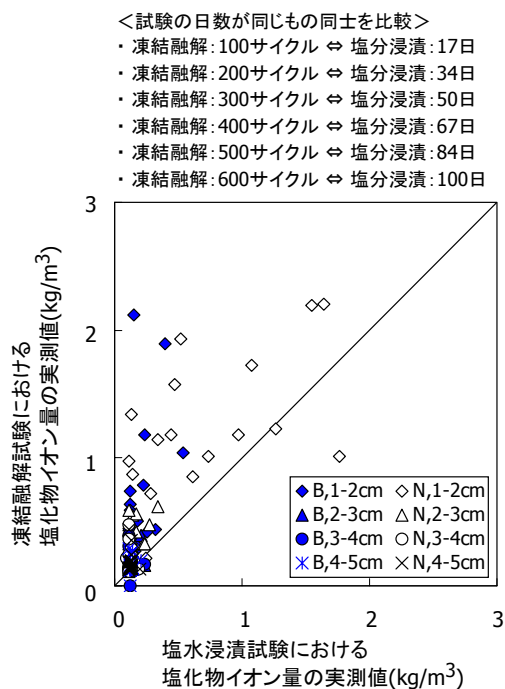


図-10 塩水浸漬試験と凍結融解試験における
深さ 1～5cm の塩化物イオン量の比較

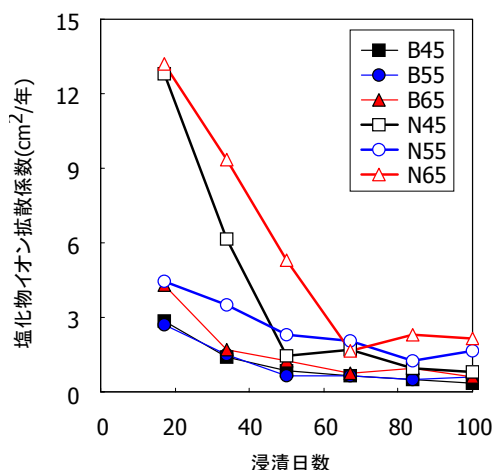


図-11 塩水浸漬試験における
浸漬日数と塩化物イオン拡散係数の関係

2.4.4 塩化物イオンの浸透予測に関する検討

(1) 塩化物イオン拡散係数を常時一定とした場合

はじめに、現在の設計で広く一般的に適用されている塩化物イオン拡散係数を常時一定として解いた Fick の拡散方程式の解である式(4)^{1), 2)}による計算を行った。

$$C(x, t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right) \quad (4)$$

ここに、 $C(x, t)$ は時間 t (年) における深さ x (cm) の塩化

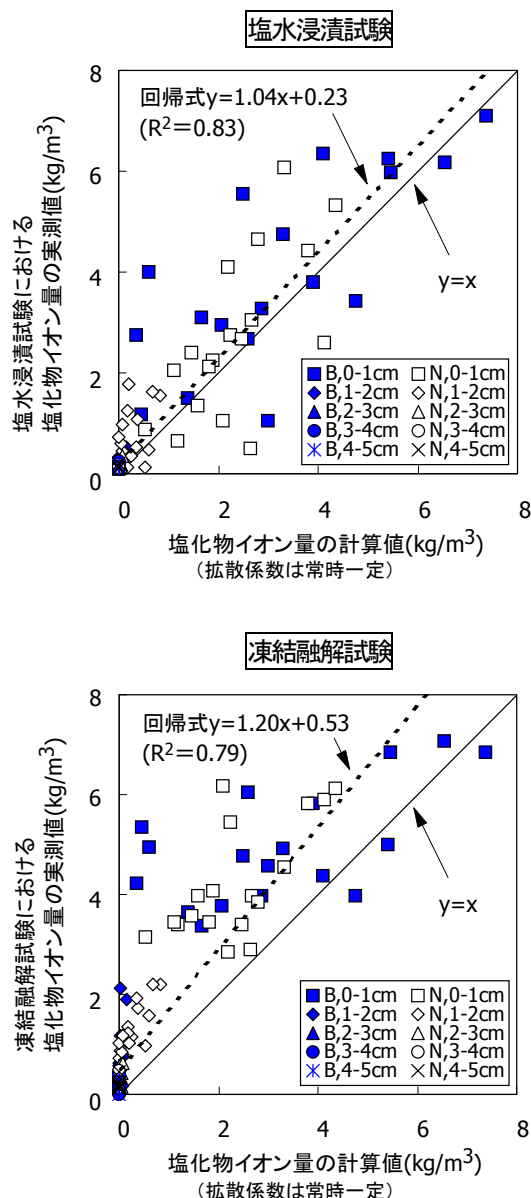


図-12 塩化物イオンの計算値と実測値

物イオン量(kg/m³)、 D は塩化物イオン拡散係数(cm²/年)、 C_0 はコンクリート表面の塩化物イオン量(kg/m³)、 erf は誤差関数である。

図-11は塩水浸漬試験における浸漬日数と塩化物イオン拡散係数の関係である。一般に塩化物イオン拡散係数は、若材齢時はばらつきが生じやすく、浸漬日数とともに減少して一定値に収束する⁹⁾傾向にあり、本研究でも同様の傾向が示された。ここでは、変動が比較的小さい67、84、100日の平均を D にあてることとした。

図-12の上に式(4)より求めた計算値と、凍結融解の影響を受けない塩水浸漬試験の実測値の関係を示す。回帰線は $y=x$ のグラフと近く、計算値と実測値は概ね対応した。このことから、式(4)は凍結融解作用を受けない塩水

浸環境下での予測には簡便なため適すると言える。

一方、図-12の下に式(4)より求めた計算値と凍結融解作用を与えた場合の実測値の関係を示す。図-12に比べるとややばらつきが増し、全体的に実測値は計算値よりも大きい値となっている。凍結融解環境下で式(4)を適用すると、塩化物イオンの浸透量が過小評価され、予測値と実測値との乖離が生じることが判明した。

(2) 塩化物イオン拡散係数を変化させた場合 (凍結融解を与えた供試体について)

ここでは、凍害の進展に応じて、それぞれの深さの塩化物イオン拡散係数を経時的に変化させた予測を試みた。なお、深さと時間の2つを変数として、各深さにおける塩化物イオン拡散係数を経時的に変化させる場合、Fickの拡散方程式そのものを解くことになるため、計算は極めて複雑になる。

このため、ここでは比較的簡易な方法として式(5)に示すFickの拡散方程式の差分解¹⁰⁾を適用した予測を試みた。

$$\begin{cases} C_{m,n+1} = Dr(C_{m+1,n} + C_{m-1,n}) + C_{m,n}(1 - 2Dr) \\ r = \frac{\Delta t}{\Delta x^2} \quad (\text{ただし } r \leq \frac{1}{2}) \end{cases} \quad (5)$$

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/m³)、 r は係数、 Δt は時間 t のきざみ幅($n\Delta t$)、 Δx は深さ x のきざみ幅($m\Delta x$)である。

なお、この差分解を活用して凍結融解環境下での塩化物イオンの浸透予測を以下の条件及び手順で試みた。

1) Δx の設定

Δx は0.5cmとした。

2) Δt の設定

一般に細孔溶液が凍結すると、塩化物イオンの移動は制限される¹¹⁾。そのため、計算を厳密に行うには、試験期間を凍結期間(塩化物イオンの移動が制限される期間)と融解期間に分け、期間が重ならないように Δt を設定する必要がある¹²⁾。しかしながら、細孔径により凍結温度が変化することから、コンクリート内部の温度を深さ毎に細かく把握することは困難であり、実環境下で凍結期間と融解期間を厳密に区分することは極めて難しい。このため、ここでは実用性を考慮して凍結と融解の期間を分けずに Δt を設定し、経時的な変化を大まかに把握することとした。 Δt は試験測定間隔にあわせて0.05年(=100サイクル≒17日)とした。

3) 表面塩化物イオン量($C_{0,n}$)の設定

計算に先立ち、まず境界条件となる式(4)の C_0 に相当

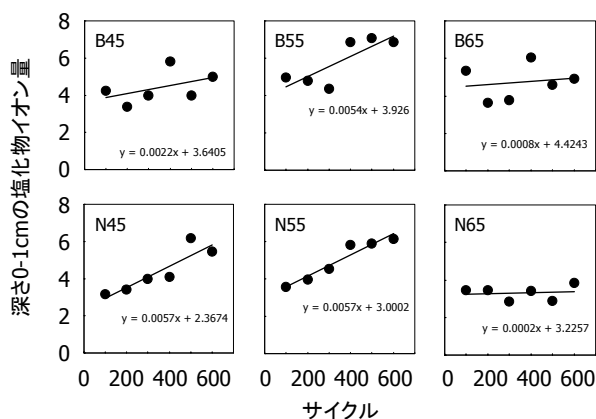


図-13 深さ0～1cmの塩化物イオンの回帰式

する表面位置の塩化物イオン量（式(5)においては C_{0n} と表される）を決定する必要がある。しかし、塩分供給環境下で凍結融解作用を与えるとスケーリングが進行し、表面位置が変化するため、 C_{0n} を決定することは難しい。

そこで、計算を簡単にするため、今回の検討では表面に最も近い深さ 0～1cm の塩化物イオン量を代用することとした。なお、深さ 0～1cm の塩化物イオン量の経時変化については実測値を一次関数で回帰分析し、その回帰式から $C_{0.5n}$ を決定することとした。図-13に各配合の回帰線を示す。ばらつきはあるが、概ね経時的に増加していることがわかる。この回帰線上の値を $C_{0.5n}$ とした。

4) 塩化物イオン拡散係数 (D) の設定

$C_{0.5n}$ を決定後、深さ 1～2cm、2～3cm、3～4cm、4～5cm の塩化物イオンの実測値を式(5)に代入し、 D を変化させて、各深さの塩化物イオン量の計算値 ($C_{1.5n}$ 、 $C_{2.5n}$ 、 $C_{3.5n}$ 、 $C_{4.5n}$) との残差平方和が最小となる深さ 0.5～1.5cm 間、1.5～2.5cm 間、2.5～3.5cm 間、3.5～4.5cm 間の塩化物イオン拡散係数を求めた。なお、ここでは計算を簡単に行うため、塩化物イオン拡散係数の経時変化は一次関数で表せると仮定した。また、各深さ (0.5～1.5cm、1.5～2.5cm、2.5～3.5cm、3.5～4.5cm) 内においては、拡散係数は一定と仮定した。

5) 結果

図-14に深さ 0.5～1.5cm 間、1.5～2.5cm 間、2.5～3.5cm 間、3.5～4.5cm 間の塩化物イオン拡散係数の経時変化を示す。0 サイクルは凍害を受ける前、すなわち塩水浸漬試験の塩化物イオン拡散係数（図-11の浸漬 67、84、100日の平均）をあてている。塩化物イオン拡散係数は、深さ 0.5～1.5cm と深さ 1.5～2.5cm の一部では経時的に増加する傾向を示したのに対し、深さ 2.5cm～4.5cm では変化が表れなかった。本年度の研究では、深さ方向における相対動弾性係数の差は殆どなかった（図-3）ものの、塩化物イオン拡散係数については深さ方向で差が生じ、表面側で大きい結果が示された。スケーリングの進行による剥離面直下組織の激しい損傷によって塩化物イオンが

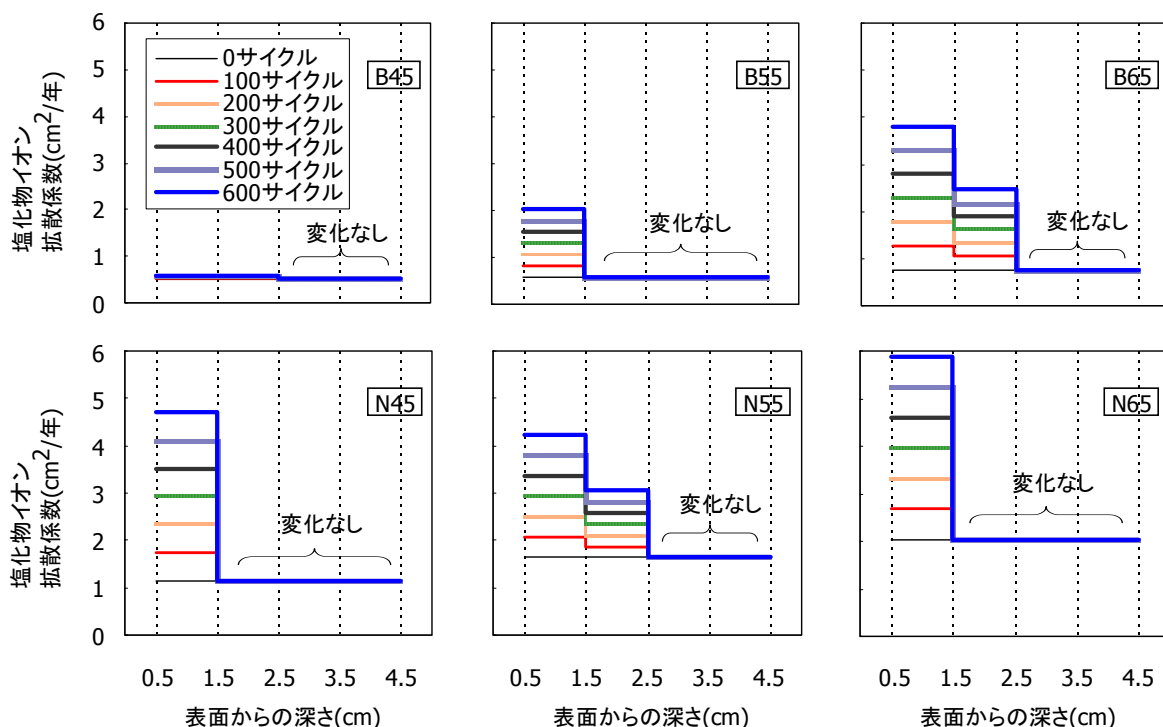


図-14 差分解により求めた凍結融解を与えた供試体のそれぞれの深さの塩化物イオン拡散係数の経時変化

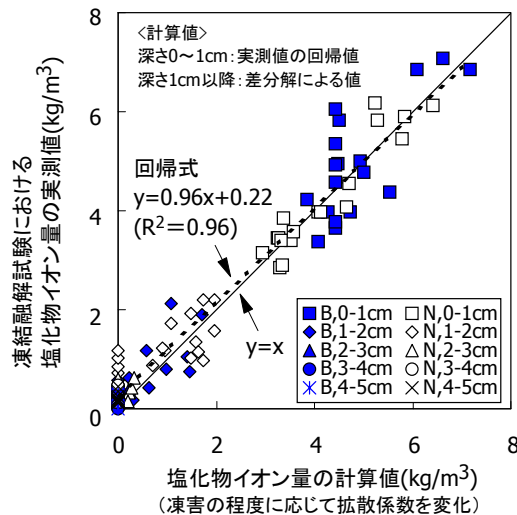


図-15 差分法による塩化物イオンの計算値と実測値（凍結融解試験）

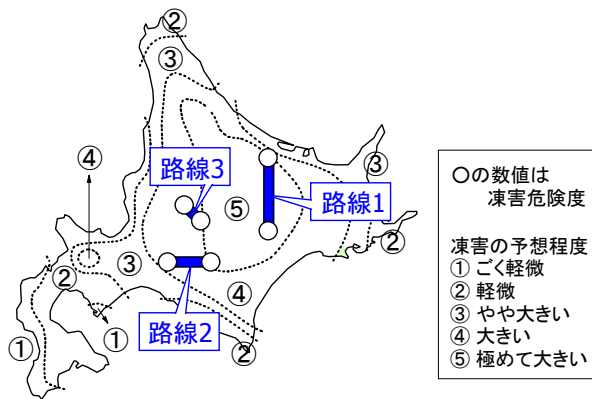


図-16 調査路線

表面で入りやすくなり、表層に多く浸透し、剥離面に近い深さ0.5～2.5cmを中心に影響が強く表れたことが考えられる。また、塩化物イオン拡散係数に及ぼす凍害の影響は水セメント比が大きいほど、また普通ポルトを用いたシリーズで顕著に表れやすいことが確認された。

図-15は、図-14の深さ毎の拡散係数の経時変化をもとに差分法で求めた塩化物イオン量の計算値と、実験により凍結融解作用を与えた時の塩化物イオン量の実測値を比較したものである。図-13に比べるとばらつきは小さく、計算値と実測値は良く対応しており、いずれのセメントを用いた場合も、凍結融解によって発生するスケーリングとひび割れの影響を考慮した塩化物イオンの浸透性は差分法で表現できる結果を得ることができた。

今後はさらに、実構造物への適用に向けて、塩化物イオン拡散係数の増加傾向と凍害による損傷の程度の関係について詳しく調べていく予定である。

表-2 調査した道路橋

路線	調査箇所		凍害危険度	凍結防止剤散布量※
	橋名	架設年		
1	1-1	1976	5	1
	1-2	1967		
	1-3	1959		
	1-4	1967		
	1-5	1957		
	1-6	1964		
2	2-1	1973	4	12
	2-2	1985		
	2-3	1984		
	2-4	1970		
	2-5	1973		
	2-6	1982		
3	3-1	1988		3
	3-2	1995		

※2003年度の値。路線1の散布量を1として比で表示。



写真-3 外観調査の状況（橋台）

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

3.1 調査箇所

図-16に凍害による劣化予想程度を示す凍害危険度マップと今回行った調査路線位置、表-2に調査した道路橋の架設年、凍害危険度、凍結防止剤散布量を示す。凍害危険度は長谷川¹³⁾が最低気温や凍結融解日数などの気象データを基に凍害の発生の危険性を地域ごとにグレード分けしたものである。調査部位は橋台とした。調査は過年度の外観調査¹⁴⁾（写真-3）から凍害危険度5地域の路線1に架かる34橋と凍害危険度4地域の路線2に架かる25橋から外見上、凍害による損傷が大きかった橋を6橋ずつ計12橋選定し、これに凍害危険度4地域の路線3に架かる2橋を加えた計14橋で行った。なお、橋は山間部に位置しており、2003年度における路線全線の凍結防止剤散布量は、路線1を1で表すと路線2は12、路線3は3である。

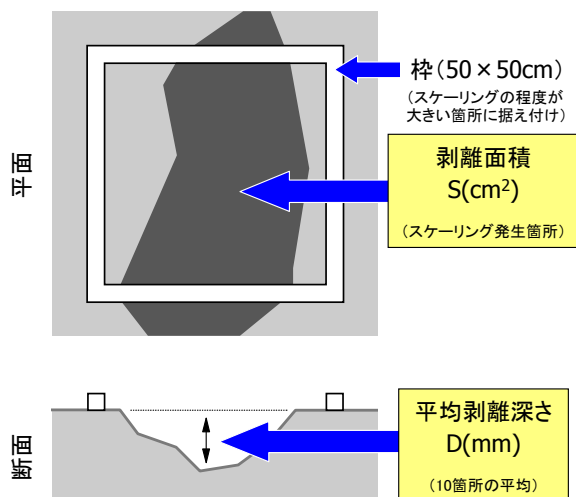


図-17 剥離度の測定方法



写真-4 コア採取の状況（1-2橋）

3.2 調査内容

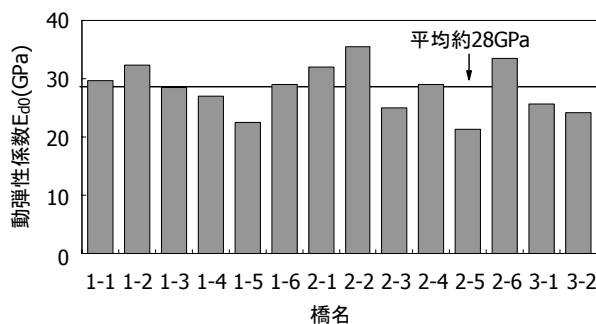
3.2.1 剥離度（スケーリングの評価）

室内実験では剥離片を採取し、その質量を調べることでスケーリング量の評価を行うが、構造物ではそのような測定を行うことは不可能であるため、式(6)に示す剥離度¹⁵⁾により評価を行った。

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

ここに、 D_m は剥離度(mm)、 D は平均剥離深さ(mm)、 A_s は剥離面積率、 S は50×50cmの枠内における剥離面積(cm^2)である。

図-17に剥離度の測定方法を示す。はじめに調査箇所50×50cmの枠を据え付け、剥離深さを枠内で10点測定し、その平均(D)を求めた。次に、枠内のコンクリート面をデジタルカメラで撮影し、画像解析により剥離面積(S)を求め、これを枠の面積(50×50cm)で除して剥離面積率(A_s)を求めた。そして、両者の積から剥離

図-18 各橋台の E_{d0}

度を求めた。

3.2.2 相対動弾性係数（ひび割れの評価）

剥離度を測定した箇所の近傍から $\phi 10 \times 6 \text{cm}$ のコアを採取し（写真-4）、コアを挟み込む形でコアの両側面に超音波測定器（周波数 28kHz）の発・受振子をあてる透過法により、剥離面から深さ 1、2、…、6cm の超音波伝播時間を測定し、式(7)³⁾より各深さの相対動弾性係数を調べた。

$$\begin{cases} E_{dN} = 4.0387V_N^2 - 14.438V_N + 20.708 \\ RE_d = \frac{E_{dN}}{E_{d0}} \times 100 \end{cases} \quad (7)$$

ここに、 E_{dN} は凍結融解を N 年受けた時の動弾性係数(GPa)、 V_N は凍結融解を N 年受けた時の超音波伝播速度(km/s)、 RE_d は凍結融解を N 年受けた時の相対動弾性係数(%)、 E_{d0} は凍結融解を受ける前の動弾性係数(GPa)である。なお、 E_{d0} は、同じ橋台の中で外見上健全な箇所から採取した $\phi 10 \times 35 \text{cm}$ のコアの最深部の動弾性係数と、調査箇所から採取した $\phi 10 \times 6 \text{cm}$ のコアの各深さの動弾性係数の中で最も大きい値を各コア毎にあてることとした。図-18に各橋台の E_{d0} を示す。多少ばらつきはあるが、 E_{d0} は平均約 28GPaであった。

なお、建設当初からの深さは剥離によって変動しているが、ここではそれらを考慮して、調査データの比較を行っている。

3.2.3 塩化物イオン量

塩化物イオン量の測定は、相対動弾性係数の測定のために凍害を受けた箇所から採取した $\phi 10 \times 6 \text{cm}$ のコアを用いて行った。剥離面から深さ 5cm までの範囲をコンクリートカッターで 1cm 間隔にスライスし、室内実験と同様に JIS A 1154 の硝酸銀滴定法に準じて各スライス片の全塩化物イオン量を調べた。

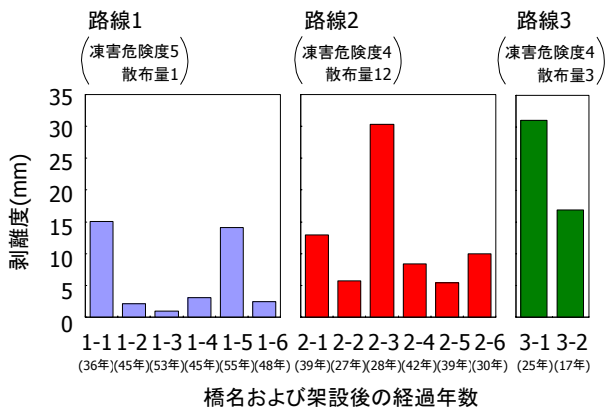


図-19 剥離度の測定結果

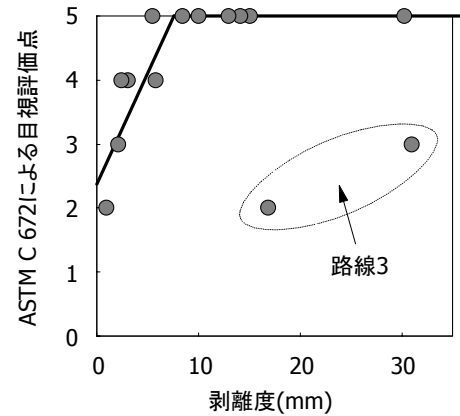


図-21 剥離度と ASTM C 672 の目視評価の関係

点	劣化事例写真	点	劣化事例写真
0	 なし	1	 粗骨材の露出なし、深さ3mm以下の剥離
2	 評価1と評価3の中間程度の剥離	3	 粗骨材がいくつか露出する程度の剥離
4	 評価3と評価5の中間程度の剥離	5	 粗骨材が全面露出する程の激しい剥離

図-20 ASTM C 672 による目視評価の基準

3.3 調査結果・考察

3.3.1 剥離度

図-19 に剥離度の測定結果を示す。調査路線の中で凍結防止剤の散布量が最も多い路線2の道路橋の橋台の剥離度の最小値は2-5橋の約5mmで、今回調査した路線2の橋台の剥離度は5mm以上で一部大きく突出した値があることが確認された。一方、路線2よりも凍害危険度が1ランク大きく、凍結防止剤の散布量が少ない路線1は、6橋のうち2橋が5mm以上と突出したものの残りの4橋は5mm未満で全体平均でも5mm未満であった。なお、調査した橋は、外見上、凍害劣化が大きいと思われる橋台を選定している。今年度の調査は、凍害危険度は4～5と同程度であり、スケーリングの進行性が凍結防止剤散

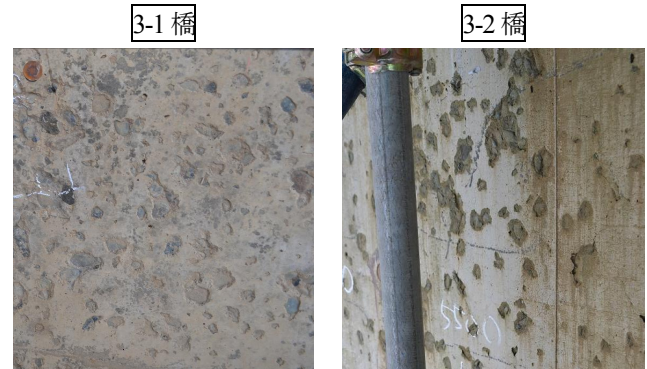


写真-5 路線3の道路橋の橋台の外観

布の影響を受ける傾向が示された。一方、路線3の橋台は路線1、2に比べると供用年数は短く、散布量も中間程度であるにもかかわらず、剥離度は全体的に大きかった。以下、理由を後述する。

今回の調査で得たデータの範囲で整理した剥離度と ASTM C 672¹⁶⁾に準じた目視評価の基準の点数(図-20)の関係について整理したものを図-21に示す。路線1と路線2については概ね規則性がみられたものの、路線3のデータはこれから逸脱する形でプロットされた。写真-5は路線3の橋台の外観を示している。表面には健全なペーストが広く残存していたものの、ポップアウトが多く確認された。図-22は圧縮強度と静弾性係数(動弾性係数から換算)の関係を示している。路線3を含めて、いずれの橋台も標準値の範囲に収まっていた。供用年数が比較的短い路線3の橋台は、全面的に激しいスケーリングは見受けられなかったものの、ポップアウトが顕著に発生しやすい骨材が混在していたために、剥離度が大きい一方、目視評価が小さい領域にデータがプロットされたためであり、今回の検討から除外することとした。

3.3.2 相対動弾性係数

図-23に相対動弾性係数の測定結果を示す。剥離度を求める際に調べた平均剥離深さもあわせて図示した。な

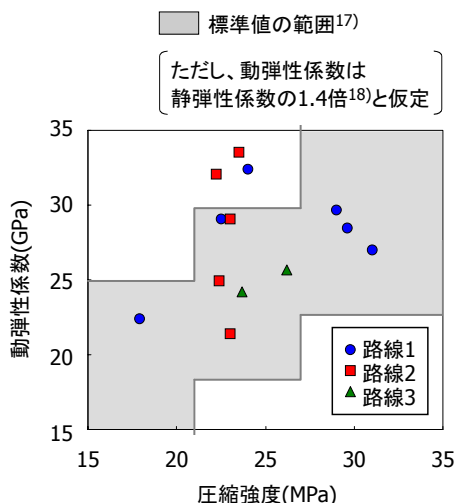


図-22 圧縮強度と動弾性係数の関係

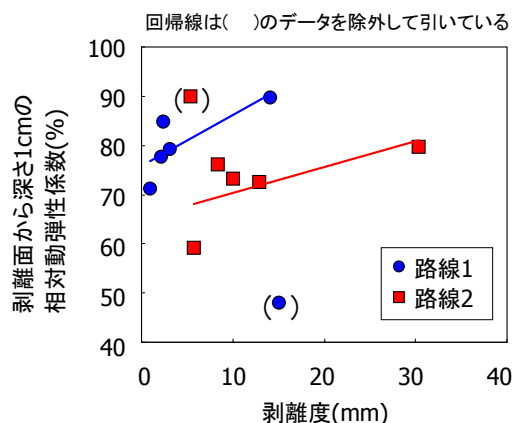


図-24 剥離度と剥離面直下（剥離面から深さ1cm）の相対動弾性係数との関係

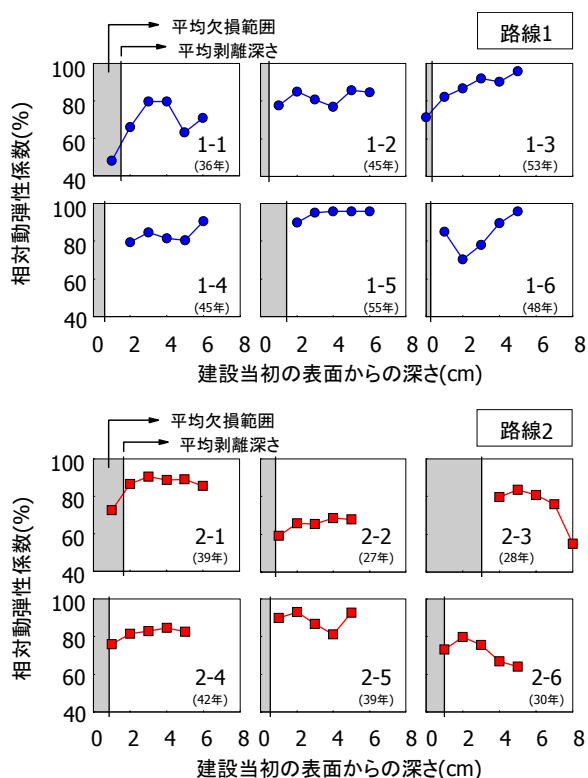


図-23 相対動弾性係数の測定結果

お、平均欠損範囲にデータがプロットされているグラフもあるが、これはコンクリートが部分的に残存しており、測定が可能であったため、測定したものである。また、建設当初の表面は剥離が生じていない箇所的位置を持って表面とした。相対動弾性係数は、2-3橋、2-6橋を除くと、表面側ほど小さい結果が概ね示されており、凍害によるひび割れが先ず表面側で発生し、その後、凍害が内部へ進展している傾向が見て取れる。2-3橋、2-6橋については、コンクリート内部に欠陥が存在している可能性

も疑われるものの、内部の相対動弾性係数が小さかった理由については不明で、原因の特定には至らなかった。今回調査した橋台における平均剥離深さ以降の相対動弾性係数は、いずれもマッシュパなコンクリートにおいて一般的な耐凍害性を評価するための限界値 60%⁵⁾を概ね上回っていた。

図-24 は剥離度と剥離面直下（剥離面から深さ 1cm）の相対動弾性係数との関係を整理したものである。路線毎にみると、ばらつきはあるものの、剥離面直下の相対動弾性係数は、剥離度が大きい橋台ほどやや大きい傾向が見受けられ、スケーリングの程度と剥離面直下の相対動弾性係数の低下度合は必ずしも対応しないことが確認された。これと同じ傾向は既往の調査¹⁹⁾でも示している。剥離度が小さい橋台の剥離面は、主に建設当初から存在・露出しているもので、比較的長い期間、厳しい外気に曝されている。一方、剥離度が大きい橋台の剥離面は、スケーリングの進展に伴い、後に露出した内部である。剥離面が外気に曝されている期間の違いが影響していることが考えられる。

3.3.3 塩化物イオン量

図-25に塩化物イオン量の測定結果を示す。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、これは前述の相対動弾性係数と同様、コンクリートが部分的に残存していたため、測定したものである。剥離面から深さ5cmまでの範囲における塩化物イオンの総量は、全体的に路線1よりも路線2の方が多く、凍結防止剤の散布傾向と対応する結果が示された。1-4橋、1-5橋、2-1橋、2-2橋、2-3橋、2-4橋、2-6橋では、表面側の塩化物イオン量が減少している傾向がみられるが、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

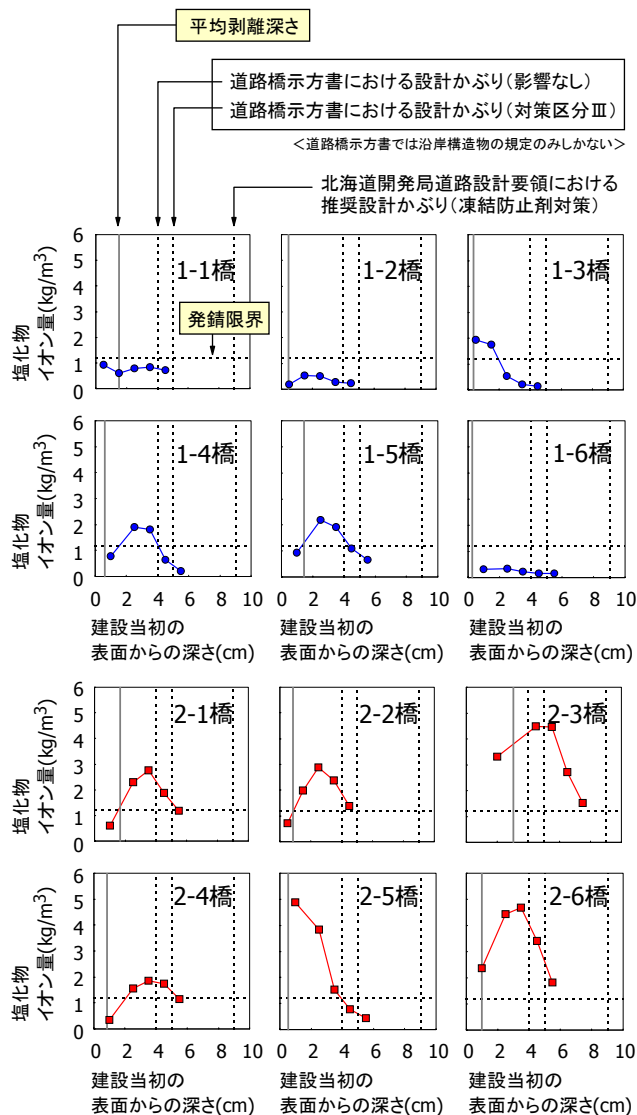


図-25 塩化物イオン量の測定結果

で剥離面近傍の塩化物イオン量が減少した^{20), 21)}ことが考えられる。

道路橋示方書²²⁾では、今回調査を行った山間部は通常の区分では基本的に「影響なし」もしくは「対策区分Ⅲ」のエリアに分類される。本橋梁は内陸部に位置し、スパイクタイヤの規制に伴う凍結防止剤散布前に施工された橋梁であり、これに相当する設計かぶり（前者は4cm、後者は5cm）をグラフに書き入ると、路線1は概ね発錆限界を下回っているのに対し、路線2と路線3は全体的に発錆限界を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²³⁾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、相当する設計かぶり（9cm）を同じくグラフに書き入ると、路線2の2-3橋は発錆限界到達の疑いがあるものの、それ以外の橋は発生限界に到達している可

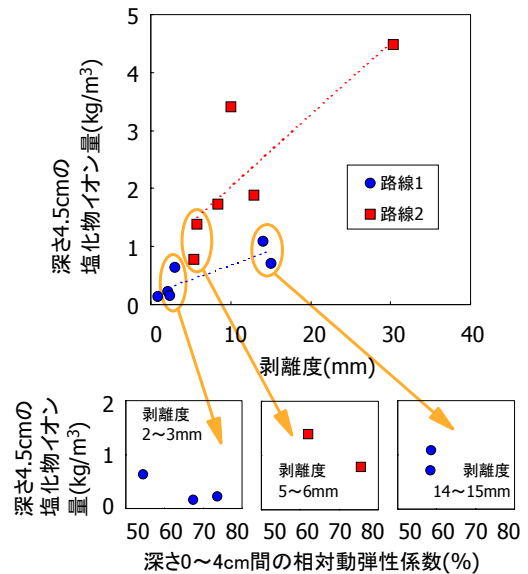


図-26 塩化物イオンの浸透に及ぼす凍害の影響

能性は低いように評価される。一方、路線1は、いずれの橋台も発錆限界には達しておらず、発錆限界を大幅に下回っており、余裕を持った安全側の設計となっている。このようなことから、今後、寒冷環境下での合理的な耐久性設計法の確立に向け、実環境下での塩化物イオンの浸透速度と凍結融解および凍結防止剤の散布量の関係を更に定量的に明らかにしていく必要がある。

図-26 は塩化物イオンの浸透に及ぼす凍害の影響を整理したものである。道路橋示方書における設計かぶりに相当する4~5cm（ここでは4.5cmとした）の塩化物イオン量は、剥離度が大きいほど多い傾向が示された。また、剥離度が概ね同じ現場のデータに着目すると、塩化物イオン量は相対動弾性係数が小さいほど多い傾向が概ね見られる。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していることが確認された。

3.4 凍害の進行予測の試み（路線1）

建設段階等でのコンクリート構造物の耐久性設計や維持管理を行う上で重要な凍害の各種劣化形態が複合した構造物の性能評価法の開発に向けて、現地データによる凍害の進行予測式および塩化物イオン浸透に関する検討を行った。ここでまずは、凍結防止剤の散布量が少なく、建設当初から現在までの間、環境が大きく変動していないと思われる路線1の橋台を対象に、現場で取得した実測値をあてはめることにより凍害の進行予測を試みた。予測式は室内実験の結果を踏まえて、次式を用いることとした。

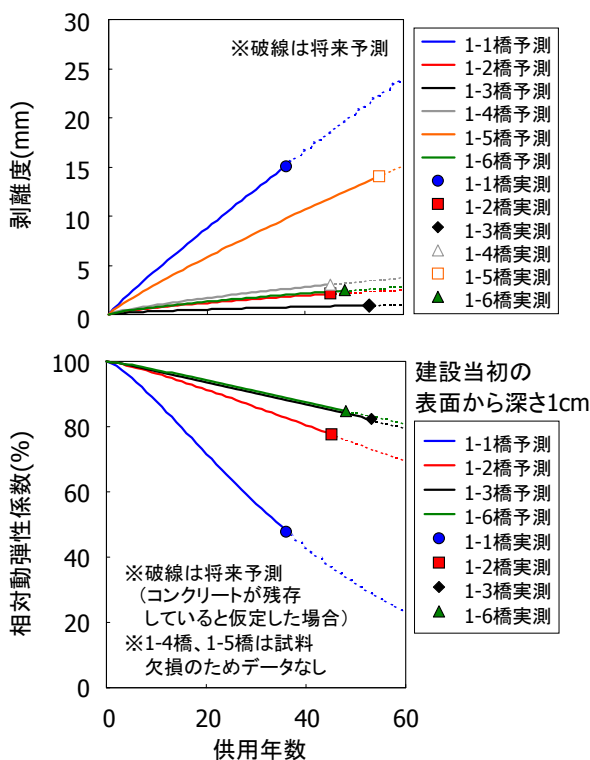


図-27 路線1の道路橋の橋台における剥離度および相対動弾性係数の予測 (相対動弾性係数は建設当初の表面から深さ1cmの結果を代表して掲載)

$$D_m = ae^{b \log \frac{t}{A}} \quad (8)$$

$$RE_d = 100e^{-c \cdot t^d} \quad (9)$$

ここに D_m は剥離度(mm)、 RE_d は相対動弾性係数(%), t は凍結融解履歴、 A は t を無次元化させるための係数、 a 、 b 、 c 、 d は条件によって定まる係数である。

ここでは、供用年数を t にあてることとし、 A については、それぞれの橋ごとに係数 a 、 b 、 c 、 d の比較を行う理由から各橋とも同じ値とし、路線1に架かる34橋の道路橋の供用年数のおおよその中間値をとって30とした。

図-27 に剥離度および相対動弾性係数の予測の結果 (ここでは代表して、建設当初の表面から深さ1cmにおける予測の結果を掲載)、図-28 および図-29 に今回調査した橋台における式(8)、式(9)の係数 a 、 b 、 c 、 d を示す。一つの実測値をもとに試行的に行った予測ではあるものの、1-1、1-5 橋では突出した予測図となっているが、他の橋はほぼ剥離度、相対動弾性係数とも同様な劣化予測曲線となっていることから、既往のコンクリートの配合設計・施工指針に準じて橋台が路線1に建設された場合

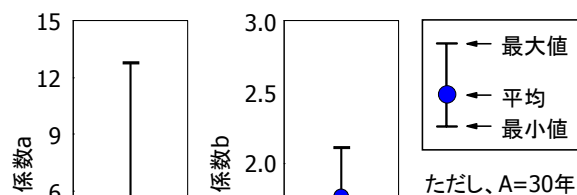


図-28 剥離度の予測式の係数 a 、 b (路線1の道路橋の橋台)

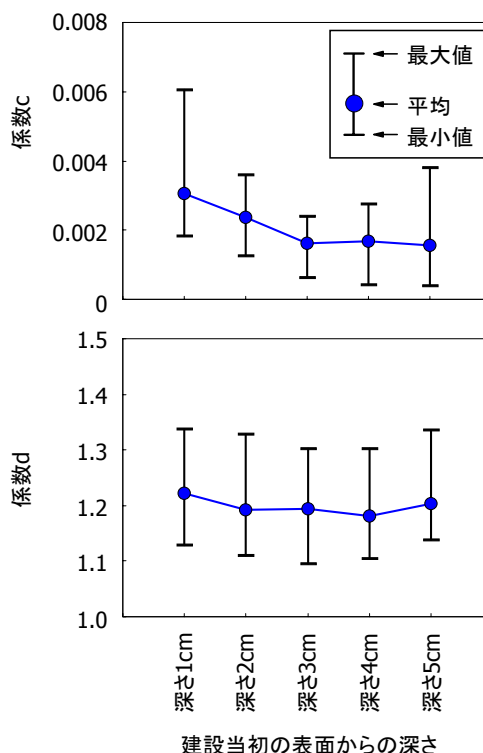


図-29 相対動弾性係数の予測式の係数 c 、 d (路線1の道路橋の橋台)

の橋台の凍害の進行予測式を得ることができると考えられる。なお、グラフが突出していた1-1、1-5 橋については、さらに今後、他の要因の有無の検討を行うとともに、同一区間でのデータを充実することで精度確認を行っていきたい。 $A=30$ とした場合の路線1の橋台における剥離度の予測式の係数の平均は a が4.54、 b が1.76であった。相対動弾性係数の予測式の係数 (深さ1~5cmの範囲) は、 c が0.001~0.003で、 c は表面からの距離が長くなるにつれて小さくなる傾向が示された。 d は1.2程度で、 c とは対照的に、深さによらず概ね一定の値が示された。

今後はさらに、係数 a 、 b 、 c 、 d と環境およびコンクリートの品質との関係の詳細な整理、また、塩化物イオンの

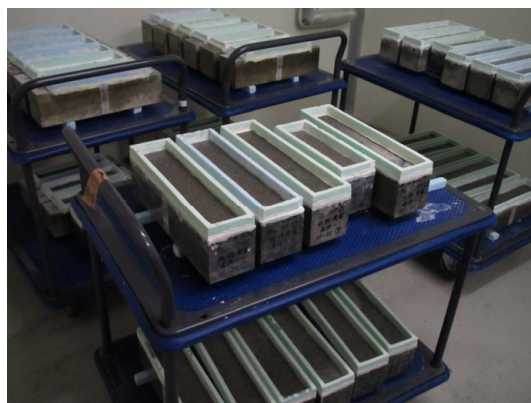


写真-6 凍結融解試験の状況 (ASTM C 672)

供給環境がスパイクタイヤの使用が規制されて以降、大きく変化した路線2や3においても凍害の進行予測ならびに係数 a 、 b 、 c 、 d の把握を行い、最終的には成果を耐久性設計技術へフィードバックさせる予定である。

4. 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室内実験（凍結速度の影響）

4.1 実験概要

凍害の進行性ならびに塩化物イオンの浸透性に及ぼす環境（凍結速度）の影響を調べるため、ASTM C 672に準じた凍結融解試験を行ってスケーリング量、相対動弾性係数ならびに塩化物イオン量を調べ、2章で述べたJIS A 1148の実験結果との比較を行った。最低温度はJIS A 1148、ASTM C 672ともに -18°C で、凍結速度はJIS A 1148が $7.5\sim 10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ であるのに対し、ASTM C 672は $4^{\circ}\text{C}/\text{h}$ である。

コンクリート配合および使用材料は2章に同じである。 $10\times 10\times 40\text{cm}$ 寸法のコンクリートを作製し、2章と同じ方法で養生した後、ASTM C 672に準じた1面凍結融解試験（写真-6）を行った。試験面は2章に同じく、打設面とした。打設面に囲いを据え付けて、塩水を深さ6mm張った後、 -18°C で16時間、 23°C で8時間の1日1サイクルの凍結融解作用を400サイクルまで与えた（実験は現在も進行中で600サイクルまで行う予定である）。途中、100、200、300、400サイクルにスケーリング量および透過法による深さ1、2、…、8、9cmの相対動弾性係数の測定を行い、2章で述べたJIS A 1148の実験結果との比較を行った。また、200、400サイクルに深さ1～5cm間の塩化物イオン量を測定し、深さ0.5～1.5cm、1.5～2.5cm、2.5～3.5cm、3.5～4.5cm間の塩化物イオン拡散係数の変化を差分法（式(5)）により調べた。

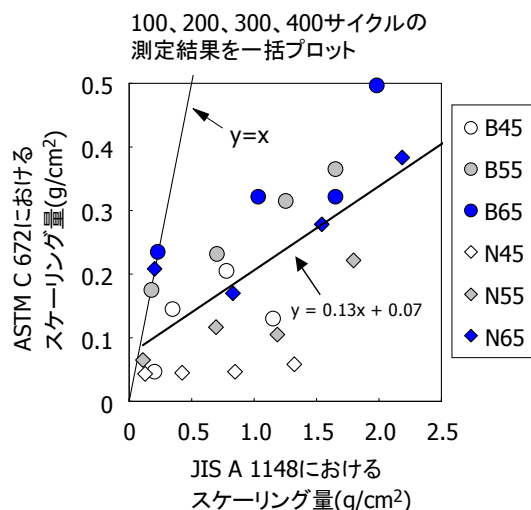


図-30 スケーリング量の比較

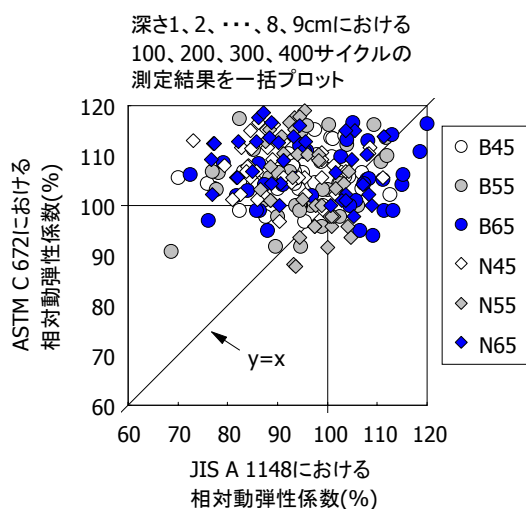


図-31 相対動弾性係数の比較

4.2 実験結果・考察

400サイクルまでの途中経過におけるJIS A 1148とASTM C 672のスケーリング量ならびに相対動弾性係数の測定結果の比較を図-30および図-31に示す。ASTM C 672のスケーリング量はJIS A 1148の約0.15倍まで減少、一方、相対動弾性係数は、JIS A 1148は80～120%の範囲にデータがプロットされているのに対し、ASTM C 672は大半のデータが100%以上の範囲にプロットされ、値が殆ど低下しない傾向が示された。

図-32に400サイクルまでの深さ0.5～1.5cm間、1.5～2.5cm間、2.5～3.5cm間、3.5～4.5cm間の塩化物イオン拡散係数の経時変化を示す。JIS A 1148では深さ1.5cmもしくは2.5cmまでの範囲で塩化物イオン拡散係数の増加が示された（図-14）が、ASTM C 672においても同様に

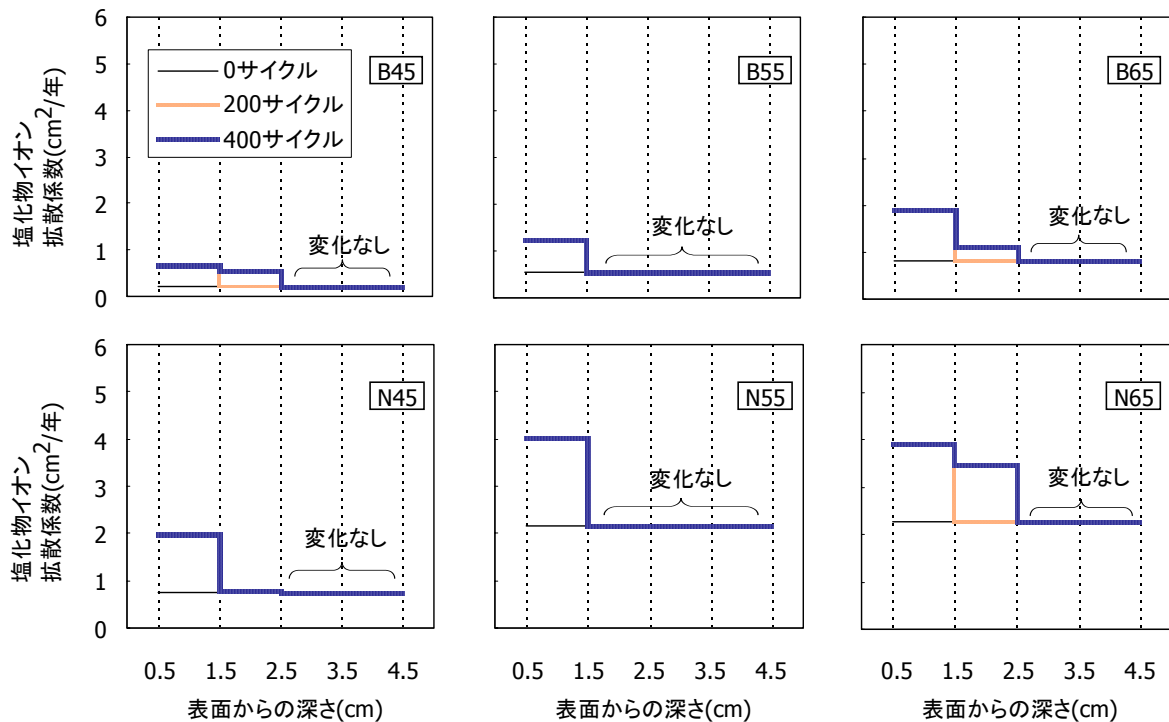


図-32 差分解により求めた凍結融解を与えた供試体のそれぞれの深さの塩化物イオン拡散係数の経時変化 (ASTM C 672)

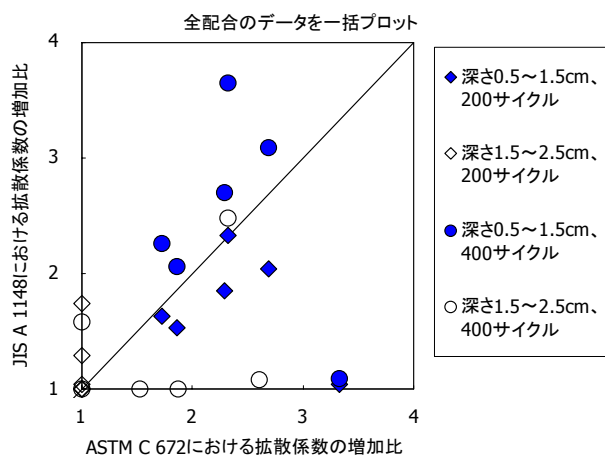


図-33 拡散係数の増加比の比較

深さ 1.5cm もしくは 2.5cm までの範囲で塩化物イオン拡散係数の増加の傾向がみられた。図-33 は拡散係数の増加の割合を比較したものである。400 サイクルまでの段階においては JIS A 1148 に比べると、ASTM C 672 の方が凍害による拡散係数の増加の割合は小さくなる傾向が示されているが、更に継続して試験を行い、判断していく必要がある。

5. まとめ

2 種類以上の凍害形態（例えば、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性能評価法の提案に向け、平成 24 年度は、(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)複合化した凍害の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 つを目的に、(1)と(2)はセメントの種類（普通ポルト、高炉 B 種）ならびに凍結速度に着目した実験、(3)は前年度に目視調査を実施した気象条件が厳しい北海道山間部の道路橋の橋台の中から凍害劣化が大きい橋台を選定し、コア採取による詳細調査を行った。本年度の研究の範囲で得た知見を整理すると、以下のようになる。

- (1) 凍結融解と塩化物の複合作用による凍害（スケーリング・ひび割れ）劣化曲線は、基本的に既研究に基づく簡易なモデルの組み合わせにより求めることができる。
- (2) 凍結融解によって発生するスケーリングとひび割れの影響を加味した塩化物イオンの浸透性は、Fick の拡散方程式の差分解を活用することで、比較的精度良く評価することができる。
- (3) スケーリング量は、部分的な角欠けが発生するまでの間において、普通ポルトよりも高炉 B 種の方が多

い傾向を示したが、相対動弾性係数に及ぼすセメントの種類の影響は明確に表れなかった。

- (4) 曲げ強度は、塩水浸漬環境下では水和の増進により1.4倍増進したものの、凍結融解作用によって相対動弾性係数が80%程度まで低下すると0.6～0.9倍となる。
- (5) 橋台のスケーリングの進行性は凍結防止剤散布の影響を受ける傾向にあった。今回調査した橋台の剥離度は、凍結防止剤の散布が小さい路線は全体的に約5mm以下であったが、散布が多い路線では5mmを大きく越えていた。
- (6) 今回調査した橋台の相対動弾性係数は全体的に概ね60%以上であった。また、ばらつきはあるものの、剥離面直下の相対動弾性係数は、剥離度が大きい橋台ほどやや大きい傾向が見受けられた。
- (7) 橋台の塩化物イオン量は凍結防止剤の散布の傾向(多・少)と概ね対応していた。また、表面から深さ4.5cm位置の塩化物イオン量は、剥離度が大きいほど多い。
- (8) 実験室で構築した式を用いて、現地における調査データをあてはめることにより、凍結防止剤の散布が少ない路線の道路橋の橋台の剥離度ならびに相対動弾性係数の進行予測を試み、一例ではあるものの、予測式を構成する係数を把握した。
- (9) 400 サイクル途中過程において、凍結速度が7.5～10°C/h (JISA 1148) から4°C/h (ASTM C 672) まで低下すると、スケーリングの発生量は大きく減少、コンクリート内部の相対動弾性係数は殆ど低下しない傾向が、ならびに、凍害による拡散係数の増加の割合は小さくなる傾向が示されているが、更に継続して試験を行い、判断していく。

6. 今後の課題

平成25年度以降は、現地データ解析を進め、実験式を補正した凍害の進行予測式の構築およびこれらの複合劣化予測を組み込んだ塩化物イオンの浸透に関する評価式の開発を進めていく。また、夏期の乾湿作用や脱スパイクタイヤ以前の建設橋台の様に凍結防止剤散布開始前に純粋凍害を先行的に受けている場合も考慮した予測式の検討等も行い、充実を図る。さらに、これらを取りまとめ、建設当初の耐久性設計や予防保全等に活用できる凍害の各劣化形態を複合的に受けたコンクリートの性能評価法として提案する予定である。

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.119, 2008.3
- 2) 土木学会:2007年制定コンクリート標準示方書「維持管理編」, p.112, 2008.6
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 文献1), p.123
- 6) 長谷川寿夫, 藤原忠司:コンクリート構造物の耐久性シリーズ「凍害」, 技報堂出版, 1988.2
- 7) 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.138, 2011.3
- 8) 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
- 9) 竹田祐二, 榊田佳寛, 中村成春, 吉瀬健二:セメントペーストの塩化物イオン浸透メカニズムに関する実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.505-510, 2001.
- 10) 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
- 11) 大竹康広, 横田弘, 橋本勝文, 松本直也:凍害環境下におけるコンクリートへの凍結防止剤由来塩分の浸透性状:土木学会第66回年次学術講演会, V-069, pp.137-138, 2011.9
- 12) 遠藤裕丈, 田口史雄, 田畑浩太郎:差分法を用いた塩化物イオン浸透性に及ぼす凍結融解の影響の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.904-909, 2012.7
- 13) 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.
- 14) 田畑浩太郎, 遠藤裕丈:寒冷地山間コンクリート構造物のスケーリングとひび割れが複合した凍害の調査, 第55回(平成23年度)北海道開発技術研究発表会発表概要集, 2012.2
- 15) 北海道開発局 港湾部 港湾建設課, 社団法人 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

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

久性向上技術検討業務報告書, 2000.3

- 16) American Society for Testing and Materials : Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals (ASTM C672)
- 17) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所: 凍害が疑われる構造物の調査・対策手引書(案), p 参 4-2, 2011.10
- 18) 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.63, 1999.10
- 19) 遠藤裕丈, 田口史雄, 嶋田久俊, 星俊彦, 太田利隆, 佐伯昇, 名和豊春: 10 数年および約 40 年経過した北海道の港湾コンクリート構造物のスケーリング進行性評価, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.3, pp.484-499, 2008.9
- 20) 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
- 21) 土木学会: 2002 年制定コンクリート標準示方書「施工編」, p.24, 2002.3
- 22) 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
- 23) 平成 22 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

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 : TAGUCHI Fumio, SHIMATA Akinori,

ENDO H Hirotake, TABATA Kohtaroh,

KAWAMURA Kohji, MIYAMOTO Syuji, SATOH Hirotomo

NAKAMURA Naohisa, KASAI Takahiro

Abstract : Toward formulating suggestions for methods of assessing concrete performance when frost damage is in two or more forms (e.g., scaling and cracking), three sets of evaluations were done in FY2012. 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), experiments that focus on cement type (ordinary portland cement and blast furnace slag cement(B-type)) and freezing speed were done. For (3), the scaling ratio was measured, and the detailed survey was done by sampling cores from highway bridge abutments. The specimens for (3) were collected from among highway bridges in the mountainous areas of Hokkaido where weather conditions are severe. A visual survey was done on the bridges in FY2011, and the highway bridges selected for sampling were suspected of being severely damaged by freezing and thawing action. Concrete with blast furnace slag cement (B-type) showed more scaling during the period before partial fragmentation than that with ordinary portland cement ; however, cement type was not shown to have a clear influence on the relative dynamic modulus of elasticity. With decreases in freezing speed, scaling remarkably decreased and the relative dynamic modulus of elasticity did not decreased. In experiments, it was found that the scaling and relative dynamic modulus of elasticity were able to be expressed by the simple method. The penetration of chloride ions was able to be expressed by the difference method. It was found on the abutments of highway bridges survey that the scaling is influenced by deicing salt. On the other hand, the relative dynamic modulus of elasticity was generally higher than 60% to 80%, which shows that deicing salt application did not have a notable influence. The amount of chloride ion was found to generally correspond to the amount of deicing salt used.

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