

# 積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の塩害 に対する耐久性設計に関する研究

(独) 土木研究所 寒地土木研究所 寒地技術推進室 ○川村 浩二  
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 遠藤 裕丈  
(独) 土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 島多 昭典

コンクリート構造物の長寿命化を効率的に図るには、合理的な耐久性の設計ならびに適切な維持管理計画の立案を行う必要がある。そのためには、コンクリートの劣化に及ぼす環境の影響の評価が不可欠である。本研究では、凍結防止剤散布環境下にある北海道内の道路橋の下部コンクリートを対象に、塩化物イオン量の測定を行い、凍結防止剤散布量との関係を調べた。その結果、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、コンクリートの劣化の程度とも関係があることが確認され、塩害対策の必要性が示された。

キーワード：コンクリート、凍結防止剤、凍害、塩害

## 1. はじめに

コンクリート構造物は日々の生活を支える大切な基盤であり、適切に設計、維持管理を行う必要がある。しかし、近年、急速に進行する多くのコンクリート構造物の老朽化への対応が大きな課題となっており、コンクリート構造物の長寿命化に資する耐久性評価技術の開発が急がれている。

北海道の道路コンクリート構造物は、厳しい積雪寒冷環境下に曝されている。道路管理者は冬期間、路面に凍結防止剤を散布し、車両走行の安全確保に努めている。現在散布されている凍結防止剤の多くが塩化物系であることに鑑みると、構造物の安全性や寿命、ライフサイクルコストに影響を及ぼす塩害に対する耐久性の合理的な評価が大切となる。そのためには、実際の環境条件下で生じる劣化形態に即した耐久性評価技術の確立が求められる。

そこで、寒冷環境下におけるコンクリートの合理的な耐久性評価技術の開発に向け、凍結融解と凍結防止剤の複合作用を受ける環境下に立地する構造物における塩化物イオンの浸透状況を把握するため、北海道山間部の道路橋を対象に調査を行った。

## 2. 調査概要

### (1) 調査橋梁の選定

図-1に調査箇所を示す。図中に示す凍害危険度は、長谷川が<sup>1)</sup>全国の気象官署の資料をもとに、我が国にお



図-1 調査箇所

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(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(R274と記す)は4(大きい)、一般国道230号(R230と記す)及び一般国道453号(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、凍害に着目した外観調査を行った。次に、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、コアボーリングマシンを使用して試料を採取し、塩化物イオン量の測定を行った。表-1に抽出した橋梁の

表-1 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	累積イオン量 C <sub>l</sub> (kg/m)
R242	1-1 橋	S51	152	5	60.75
	1-2 橋	S42	15		48.94
	1-3 橋	S34	60		41.62
	1-4 橋	S42	51		7.08
	1-5 橋	S32	25		12.17
	1-6 橋	S39	14		28.66
R274	2-1 橋	S48	85	4	93.85
	2-2 橋	S60	121		93.85
	2-3 橋	S59	135		93.85
	2-4 橋	S45	40		113.00
	2-5 橋	S48	62		320.28
	2-6 橋	S57	58		366.93
R230	3-1 橋	S43	110	3	1118.40
	3-2 橋	H8	214		650.03
	3-3 橋	S57	55		698.54
	3-4 橋	S42	25		336.61
R453	4-1 橋	S61	230	3	480.81
	4-2 橋	S42	38		138.44
	4-3 橋	S39	25		438.82
	4-4 橋	S49	41		261.35

諸元と対応する凍害危険度、及び各橋梁における橋長1m当たりの累積散布塩化物イオン量(以下、累積イオン量と記す)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んだ融雪水の影響を受けやすい橋台とした。

## (2) コンクリート調査

図-2に調査概念を示す。はじめに橋台全体を見渡して、外見上、凍害の程度が大きい箇所を選定し、φ10×6cm寸法のコアを採取した。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。

なお、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、部材表面の剥離度<sup>2)</sup>並びに部材内部の相対動弾性係数についても併せて調査した。

図-3に剥離度の測定要領を示す。はじめに調査対象面に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(1)<sup>2)</sup>、(2)より剥離度を求めた。

$$D_m = D \times A_s \quad (1)$$

$$A_s = \frac{S}{50 \times 50} \quad (2)$$

ここに、 $D_m$ は剥離度 (mm)、 $D$ は平均剥離深さ (mm)、 $A_s$ は枠内におけるスケーリング面積の割合、 $S$

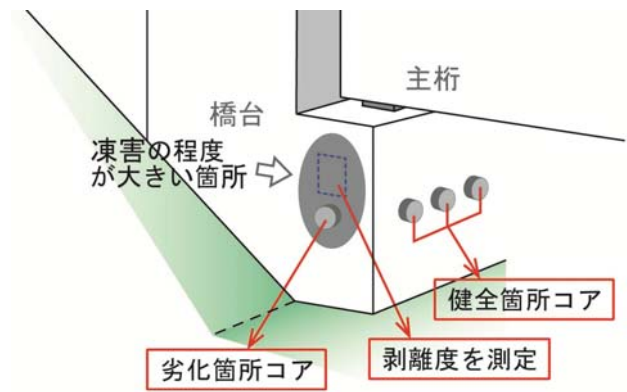


図-2 調査概念図

は枠内におけるスケーリング面積 (cm<sup>2</sup>) である。

図-4に相対動弾性係数の測定要領を示す。凍害の程度が外見上大きい箇所から採取したコア「劣化箇所コア」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、式(3)<sup>3)</sup>および式(4)より相対動弾性係数を求めた。

$$E_d = 4.0387V^2 - 14.438V + 20.708 \quad (3)$$

$$RE_d = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \times 100 \quad (4)$$

ここに、 $E_d$ は動弾性係数 (GPa)、 $V$ は超音波伝播速度 (km/sec)、 $RE_d$ は相対動弾性係数 (%)、 $E_{dn}$ は各深さにおける動弾性係数 (GPa) である。 $E_{d0}$ は部材供用前の動弾性係数 (GPa) (不明ならば、健全とみなせる箇所の動弾性係数) で、ここでは外見上健全な箇所からφ10×30~35cmのコア (図-2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(3)に代入して得られる $E_d$ を $E_{d0}$ とすることとした。

## (3) 凍結防止剤算出

北海道内の一般国道では、スパイクタイヤ規制以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、スパイクタイヤ規制後に非常に滑りやすい路面の頻出を受け、道路管理者は凍結防止剤散布による雪氷路面对策を行い始めた。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<sup>4)</sup>。ここでは、平成15年以降は概ね一定の散布量で推移していることを踏まえ、平成19年に調査された凍結防止剤の散布量のデータを用いて各調査橋梁における供用から現在に至るまでの大凡の累積イオン量を求めた。

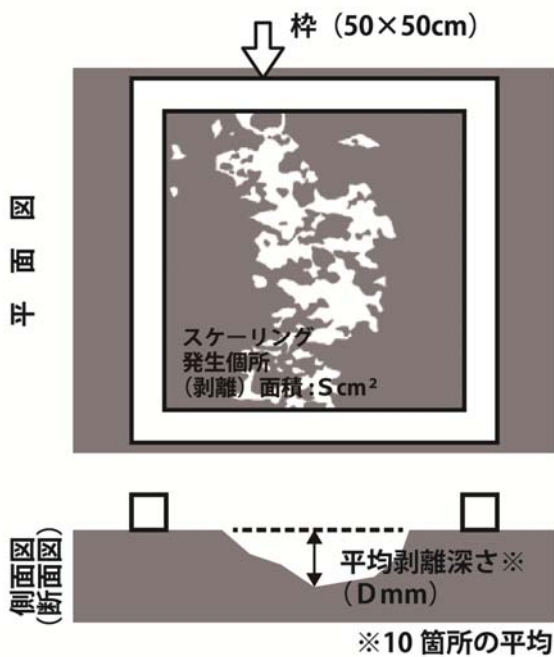


図-3 剥離度の測定要領

### 3. 調査結果

図-5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、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。グラフを見ると、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-1に示した累積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橋以外の橋梁では、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<sup>9)</sup>、<sup>10)</sup>ことが考えられる。

コンクリート標準示方書<sup>7)</sup>によると、鉄筋コンクリート構造物の鋼材位置におけ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）は、セメントの種類や水セメント比によって異なるので、個別の構造物の照査にあたっては、使用材料、配合が対象構造物に近い条件下での実測結果や試験結果を参考に発生限界を定めることが望ましいこととなっている。しかしながら、今回調査した橋梁の材料諸元が得られなかったことから、本稿で示す発錆限界は、コンクリート標準示方書で求められる発錆限界の安全側の設計値（最小値） $1.2\text{kg/m}^3$ を用いた。

道路橋示方書<sup>8)</sup>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。今回調査した橋梁は内陸部

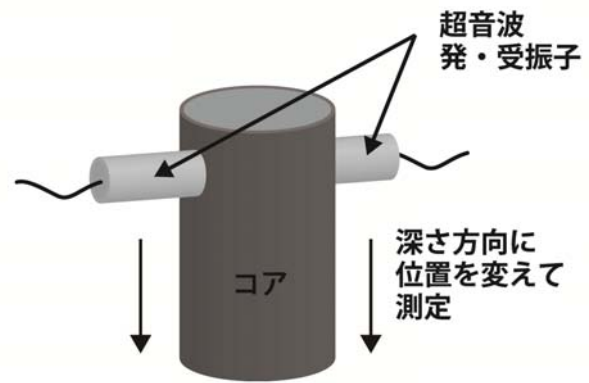


図-4 相対動弾性係数測定要領

に位置し、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以前に施工された橋梁である。これに相当する設計かぶり（前者は4cm、後者は5cm）をグラフに書き入れると、R242は概ね発錆限界を下回っているのに対し、その他3路線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<sup>9)</sup>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れると、R274の2-3橋およびR453の4-1橋は発錆限界到達の疑いはあるものの、それ以外の橋については発錆限界に到達している可能性は小さいと考えられる。一方、累積イオン量が多いR230は、現段階においてはいずれの橋台も発錆限界に達しておらず、安全側の設計がなされていると言える。

図-6は凍結防止剤散布量から求めた累積イオン量と、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の塩化物イオン量との関係を示している。全体的に累積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る。一方、図-7は、累積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の塩化物イオン量(以下、4.5cm深塩化物イオン量)の関係を調べたものである。この図より、凍結防止剤散布量と設計かぶり位置の塩化物イオン量は必ずしも対応していないことがわかる。

次に、塩化物イオンの浸透に及ぼす凍害の影響に着目する。図-8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-9は橋台竣工当初の面からの深さ1、2、3、4、5cmの相対動弾性係

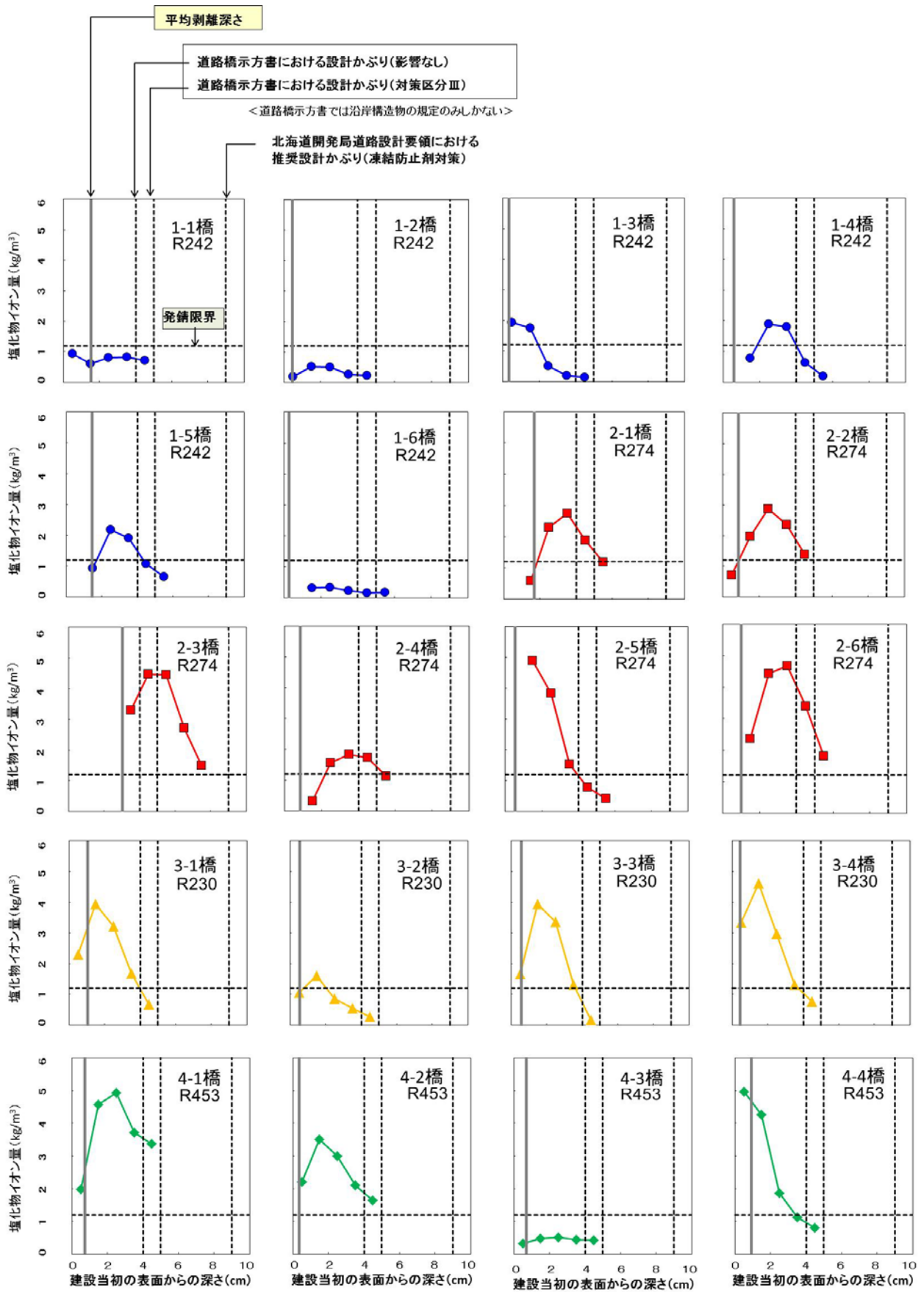


図-5 塩化物イオン量測定結果

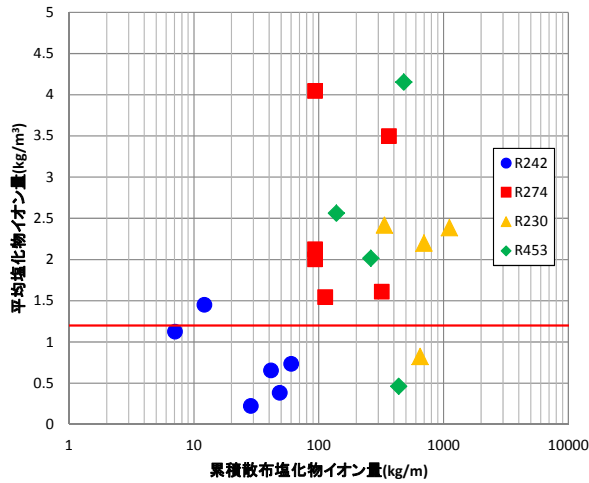


図-6 累積散布塩化物イオン量と平均塩化物イオン量

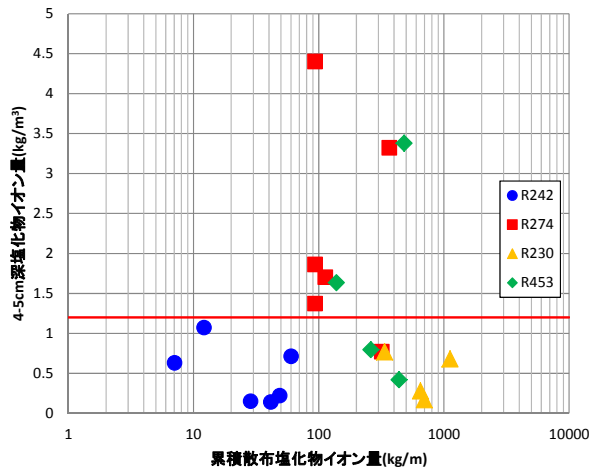


図-7 累積散布塩化物イオン量と4.5cm深塩化物イオン量

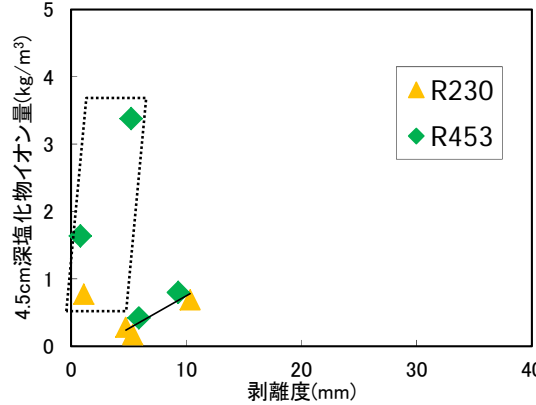
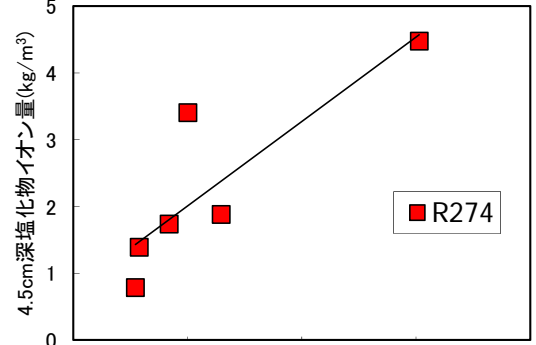
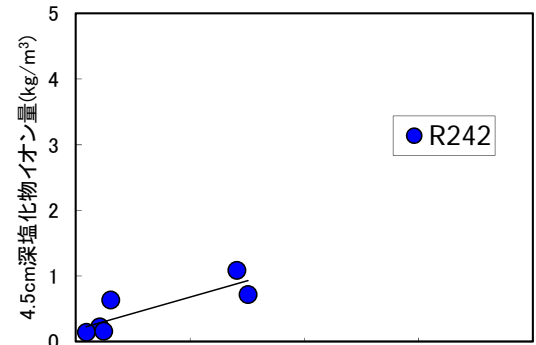


図-8 剥離度と4.5cm深塩化物イオン量

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。

このことから、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-8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よる塩化物イオンの移動・濃縮<sup>6)</sup>などが影響した可能性が疑われるものの、明確な原因の特定には至らなかった。

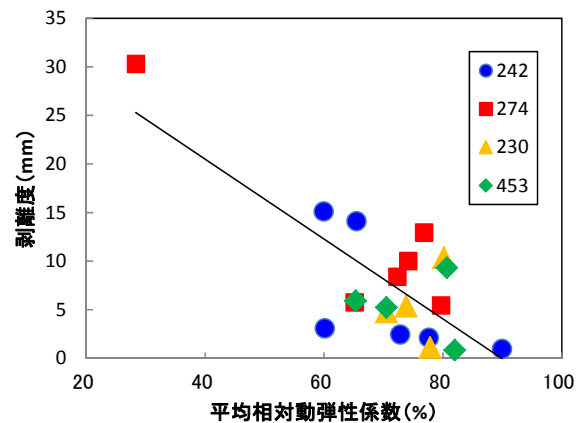


図-9 平均相対動弾性係数と剥離度



写真-1 橋台正面部劣化箇所例



写真-2 橋台側面部劣化箇所例

今回の調査では、写真-1、2に示すように橋梁上部から流れ落ちてきた融雪水が通る水みちにあたる、橋台局部で劣化箇所がみられた。伸縮装置の損傷箇所からの流出に起因する劣化は補修により防ぐことができると考えられる。また、水みちが特定出来る箇所についても、表面保護工の適用等により対策が可能と考えられる。また、橋梁点検等により橋台構造物の表面にスケーリング等が確認された場合、進行すると今回調査したR274の2-3橋のように表面部の剥落が生じ、コンクリートの耐久性に影響を及ぼすことが考えられることから、極力、凍害の進展が軽微な段階から対応にあたることが望ましいと言える。

#### 4. まとめ

寒冷環境下におけるコンクリートの合理的な耐久性評価技術の開発に向け、その一環として凍結融解と凍結防止剤の複合作用を受ける環境下に立地する構造物の塩化物イオン浸透状況を把握するため、気象条件が厳しい凍害危険度3～5の北海道山間部の道路橋を対象に調査を実施した。その結果、以下の知見を得た。

- (1) 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、凍結防止剤散布量と概ね比例傾向にある。
- (2) 4.5cm深塩化物イオン量は、剥離度が大きいほど多い。
- (3) 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。
- (4) 凍結防止剤散布箇所においては、橋梁上部からの融雪水対策の重要性は高い。

#### 5. 今後の課題

今後はデータの充実を図るため、これまでに目視調査した橋梁について、より多くのコア部材を採取し、凍結防止剤散布量と塩化物イオン浸透量の関係、並びに構造物の置かれている環境影響について詳しく調査していく予定である。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 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
- 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，日本コンクリート工学協会，2006. 12
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの診断技術' 02「基礎編」，pp. 34-36，2002. 1
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 平成25年度北海道開発局道路設計要領：p. 3コ7-5