

# 凍結融解と塩化物による複合作用を受けた 構造物の凍害目視調査 —寒冷地山間部に立地する道路橋下部コンクリート について—

(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 田畑 浩太郎

凍害に対する合理的な耐久性設計法を構築するには、実環境下におけるスケーリングとひび割れが複合化した形の凍害の発生の実態を把握する必要がある。筆者らは、過年度に凍害危険度が4で凍結防止剤の散布量が多い山間部と凍害危険度が5で散布量が少ない山間部の道路橋下部コンクリートを対象に目視による調査を行ったが、さらに詳しく把握するため調査範囲を拡大し、凍害危険度が3～5で凍結防止剤の散布頻度が各々異なる山間部で調査を実施した。その結果、凍結防止剤の散布頻度と凍害の程度は密接な関係にある傾向が得られた。

キーワード：コンクリート、凍結融解、凍結防止剤、耐久性設計

## 1. はじめに

今後、高度成長期に整備されたコンクリート構造物の維持管理及び更新にかかる費用の増加が予想される。今後は厳しい予算制約の下でコンクリート構造物の長寿命化を効率的に図り、ライフサイクルコストの縮減に務めることが社会的に求められる。適切な維持管理を行うには、耐久性の合理的な評価および劣化予測の方法の整備が不可欠である。

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位置している。道路管理者は冬期間、路面に凍結防止剤を散布し、安全な交通機能の確保に努めている。現在散布されている凍結防止剤の多くは塩化物系である。このため、海岸部と同様に、内陸部のコンクリート構造物においても凍結融解の複合作用による凍害の進展が懸念される。

現在の凍害に対するコンクリートの耐久性の評価体系は、スケーリングやひび割れといった単一の凍害形態の進行を前提としている。しかし、実際のコンクリート構造物では2種類以上の凍害形態（例えば、スケーリングとひび割れ）が同時に発生している。このため、コンクリート構造物で発生している凍害の実態に即したコンクリートの耐久性評価技術を確立する必要がある。

本研究では評価技術の確立を最終目標に位置づけ、その一環として、スケーリングとひび割れが複合化した凍害の発生の実態を把握するため、山間部の道路橋下部コンクリートを対象に目視によるスケーリングの調査と超

音波による凍害ひび割れの調査を行った。また、今回の調査で得た結果の範囲で、凍害の程度と環境（凍結融解の厳しさ、凍結防止剤の散布頻度）の関係について考察を行った。

## 2. 調査概要

### (1) 調査対象橋梁

図-1に凍害危険度マップ及び調査路線を示す。長谷川<sup>9)</sup>が提案したこのマップは、外気温上の凍結融解日数、日射による融解率、冬期間の湿潤程度、暴露実験結果等

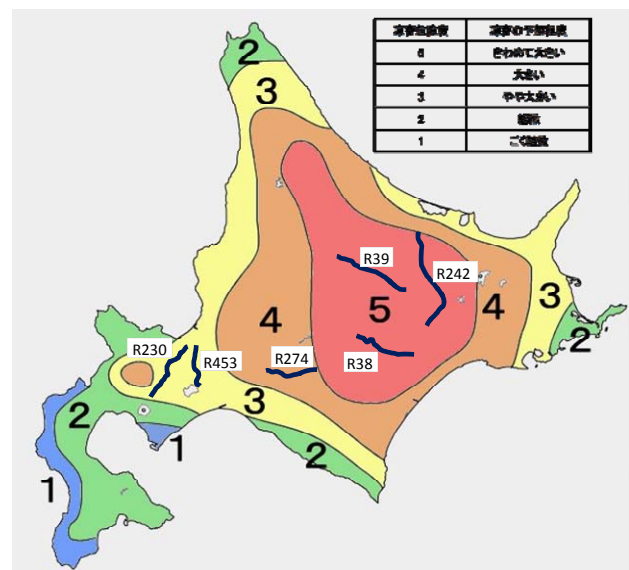


図-1 凍害危険度マップ 及び調査路線

をもとに凍害の予想程度を0～5の6段階で表したもので、凍結融解の厳しさの目安になるものである。

筆者らは昨年度、凍害危険度5の一般国道242号遠軽町～足寄町間の34橋および凍害危険度4の一般国道274号夕張市～日高町間の25橋の下部コンクリートを対象に種々の外観調査を行った<sup>2)</sup>。ここでは凍害の実態をさらに詳しく把握するため、調査範囲を拡大した。

調査は、凍害危険度5のエリアに位置する一般国道38号の狩勝峠～幕別町間の25橋と一般国道39号の愛別町～石北峠間の28橋、凍害危険度3のエリアに位置する一般国道230号の札幌市～留寿都町間の21橋と一般国道453号の札幌市～支笏湖間の11橋の下部コンクリートで行った。それぞれの調査橋梁の架設年度および橋長を表-1に示す。表中の路線-区間は、凍結防止剤散布の形態に応じた区分である。

(2) 現地調査概要

現地では、非破壊による凍害の診断を実施した。ここでは、目視によるスケーリング調査および超音波による凍害ひび割れの調査を行った。

a) スケーリング

調査は、道路橋下部の起点側と終点側の橋台を対象に行った。調査面は図-2に示すように1橋台当たり橋台両側面と中央面の3面、1橋梁当たり6面で、図-3に示すASTM C 672の基準<sup>3)</sup>に準じて粗骨材の露出状態などを詳しく調べ、その結果をもとに評価点（以下、目視評価点と記す）を付けた。そして、目視評価点が最も大きい面の値（以下、最大目視評価点と記す）をその橋の評価点とした。

b) 凍害ひび割れ

調査は、前述したスケーリングの損傷が最も大きい箇所において行った。コンクリート表面近傍に存在する劣化層の厚さを非破壊で推定する表面走査法に準じた調査を行い、既往の研究を参考に<sup>4)</sup>にコンクリ

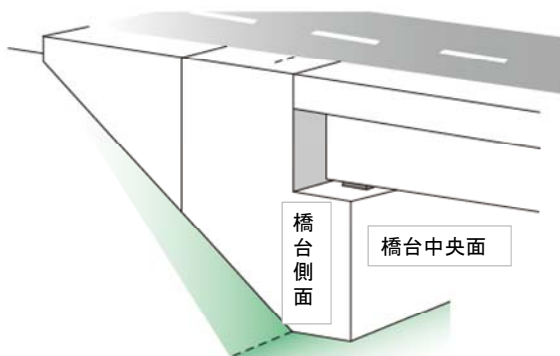


図-2 橋台調査箇所

表-1 調査対象橋梁諸元(R■は一般国道■号を表す)

路線-区間	橋梁	架設年度	橋長 (m)
凍害危険度5	R242-1	1	1976 152
		2	1967 15
	R242-2	3	1961 41
		4	1959 60
		5	1960 60
		6	1977 70
		7	1972 21
		8	1972 19
		9	1971 20
		10	1971 20
	R242-4	11	1967 13
		12	1967 35
		13	1967 51
		14	1972 14
		15	1965 41
		16	1974 90
		17	1956 23
		18	1957 25
		19	1972 19
		20	1973 13
	R242-5	21	1978 35
		22	1979 14
		23	1974 35
		24	1973 31
		25	1959 42
		26	1972 25
		27	1962 60
		28	1962 40
		29	1964 14
		30	1957 64
	R242-6	31	1969 131
		32	1989 13
		33	1989 10
		34	2002 206

路線-区間	橋梁	架設年度	橋長 (m)
凍害危険度5	R38-1	1	1988 103
		2	1995 210
		3	1965 13
		4	1965 25
		5	1965 120
		6	1965 67
		7	1984 43
		8	1964 13
		9	1974 68
		10	1963 60
	R38-2	11	1963 19
		12	1963 38
		13	1963 38
		14	1981 13
		15	1982 41
		16	1997 180
		17	1983 62
		18	1966 49
		19	1957 822
		20	1965 822
	R38-3	21	1998 16
		22	1962 228
		23	1955 160
		24	1966 20
		25	1986 10

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-3 目視評価の基準

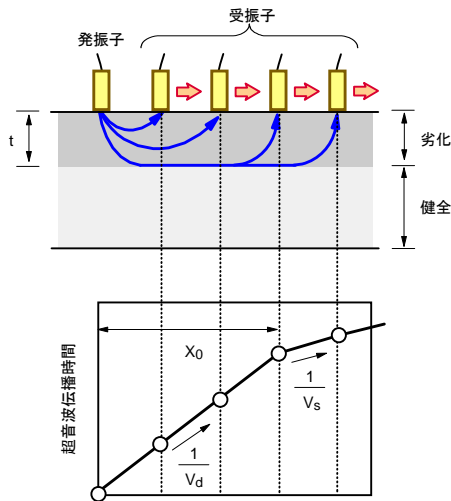


図-4 表面走査法の概念<sup>5)</sup>

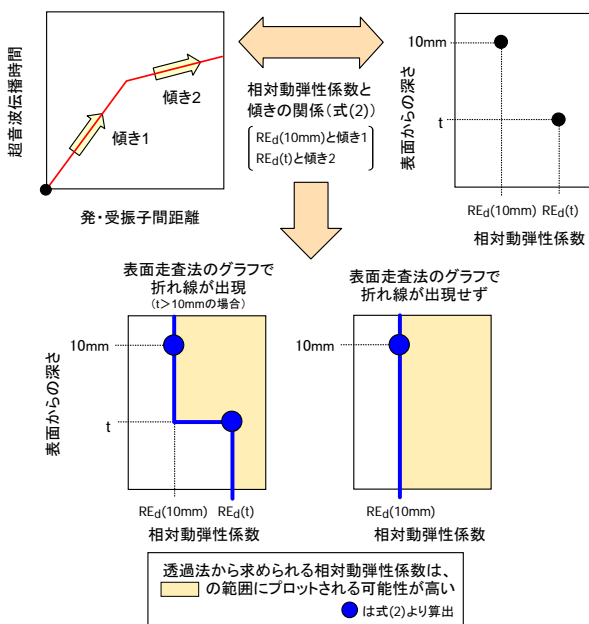


図-5 表面走査法による凍害診断の考え方<sup>4)</sup>

ート内部における相対動弾性係数の予測下限域の推定を試みた。

表面走査法は、コンクリートの表面近傍に存在する劣化層の厚さを超音波によって非破壊で推定する方法である。超音波は、損傷の程度が小さい緻密な組織を伝わりながら、最短時間で受振子に到達する性質がある。図-4に示すように、劣化層が表面近傍に存在する場合、表面に超音波の発振子と受振子を配置し、受振子を一定の間隔で発振子から遠ざけていくと、発・受振子間距離がある値以上になると超音波の伝播経路は最短距離である健全層の縁端面に一本化され、発・受振子間距離に対する伝播時間の増加の割合は小さくなる。このため、発・受振子間距離と超音波伝播時間の関係は、図-4の下に示すような折れ線グラフとなる。

ここで、原点から変曲点までの距離を $X_0$ 、劣化層と健全部縁端面における超音波伝播速度をそれぞれ $V_d$ 、 $V_s$ （グラフの傾きの逆数）とすると、劣化層の厚さ $t$ は式(1)で表される<sup>5)</sup>。

$$t = \frac{X_0}{2} \sqrt{\frac{V_s - V_d}{V_s + V_d}} \quad (1)$$

コンクリートが全体的に健全もしくは劣化している場合は、基本的に品質が一樣に均等なため、発・受振子間距離と超音波伝播時間の関係は折れ線ではなく、直線グラフとなる。その場合の $t$ は0か部材の全厚のいずれかとなる。

既報<sup>4)</sup>では、凍害診断への表面走査法の応用を試みた研究の結果が報告されている。図-5の上に示すように、傾き1と測定可能な最浅位置である深さ10mmの相対動弾性係数、および、傾き2と深さ $t$ 位置の相対動弾性係数の関係を回帰分析し、以下の実験式を示している。

$$RE_d = 21.7x^{-0.81} \quad (2)$$

ここに、 $RE_d$ は深さ10mmもしくは深さ $t$ の相対動弾性係数(%)である。 $x$ は表面走査法のグラフの傾きで、 $RE_d$ の対象が深さ10mmの場合は傾き1、深さ $t$ の場合は傾き2（図-5）の値となる。

一般に凍害による損傷は水分の影響を最も強く受けやすい表面が最も大きく、相対動弾性係数は表面から内部にかけて大きくなることから、相対動弾性係数の真値は図-5の下に示す橙色で塗りつぶした範囲にプロットされることになる。この考え方が概ね妥当であることは、凍害を受けた道路橋での調査で経験的に確認されている<sup>4)</sup>。

ここでは、この方法に基づいて予想される相対動弾性係数の下限値（図-5の下に示す青線）を調べることで内部の凍害状況を把握することとした。

#### c) 凍結防止剤散布量

凍害の程度と凍結防止剤散布量の関係を考察するために凍結防止剤散布量を調べた。散布量は、平成15年度以降安定傾向にあることを踏まえて平成15年度の値を使用した。なお、本文中の図に示している値は路線における管理区間に散布された量をその管理延長で除した値であり、今回調査した路線の管理区間の中で、凍結防止剤散布量が一番小さいR242-5を1として各路線の散布量を比率で表した。



### 3. 調査結果および考察

#### (1) スケーリング

表-1で示したそれぞれの路線-区間内全橋梁の最大目視評価点の平均値と経過年数の関係を図-6に示す。凡例の「R■」は「一般国道■号」を表している（以降の図についても同じ）。各路線とも、路線-区間毎にデータを整理し、その結果を図にプロットしている。図内の右下3点のマーカ―は一般国道242号のデータである。構造物が置かれている環境や使用材料が異なるためばらつきがあるものの、供用0~50年の範囲では、右下3点以外のデータに着目すると概ね年数の経過に伴って劣化が進行する形の分布を呈した。次に、凍結防止剤散布比率と最大目視評価点の関係について調べた。結果を図-7に示す。ばらつきがあるものの凍結防止剤散布割合が大きいほど劣化度が大きくなる傾向が認められた。

ここで、路線-区間毎に最大目視評価点の経年の増加傾向を大まかに把握し、凍結防止剤散布量との関係について考察を加えた。ここでは各橋梁における供用年数と最大目視評価点の関係について原点通過を前提に直線回歸し、その直線から供用から50年後までの最大目視評価点を10年毎に求め、凍結防止剤散布比率との関係を整理した。10年毎の最大目視評価点を求めるために作成した直線グラフを図-8~13に、そして、この図から求めた10年毎の最大目視評価点と凍結防止剤散布量の関係について整理した結果を図-14~18に示す。10年、20年経過時には、いずれの路線においても最大目視評価点は2~3以下の値を示した。一方、30年、40年、50年と経過するに従って、最大目視評価点に及ぼす凍結防止剤散布量の影響が顕著に現れた。このことから、本調査の範囲では、スケーリングに関して凍結防止剤散布の頻度と密接な関係にある傾向が得られた。

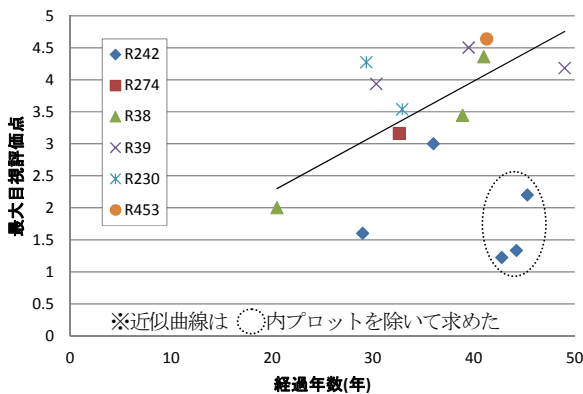


図-6 経過年数と最大目視評価点の関係

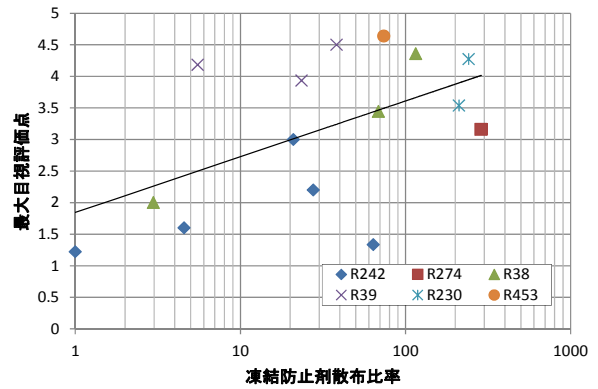


図-7 凍結防止剤散布比率と最大目視評価点の関係 (経過年数を考慮せず、実測値をそのままプロット)

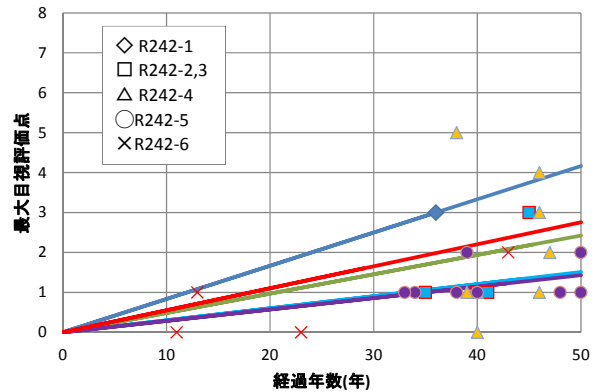


図-8 10年毎の最大目視評価点を求めるために作成した直線グラフ (R242)

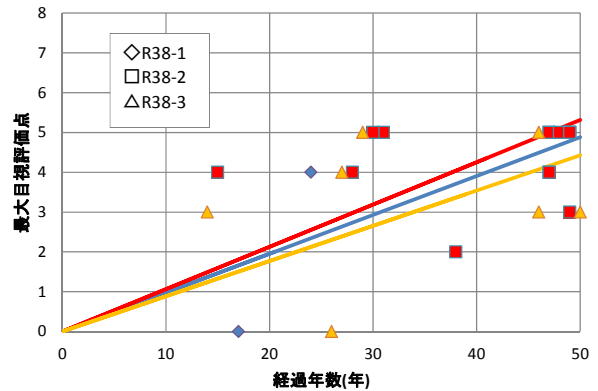


図-9 10年毎の最大目視評価点を求めるために作成した直線グラフ (R38)

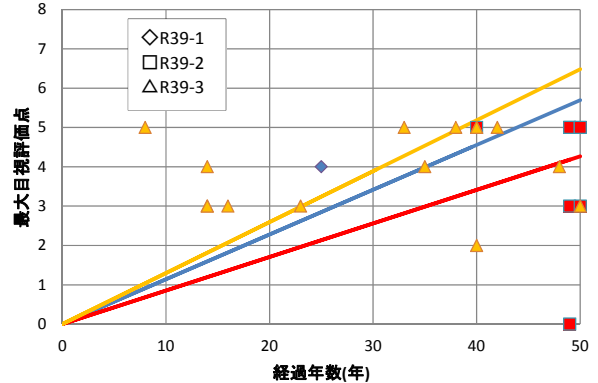


図-10 10年毎の最大目視評価点を求めるために作成した直線グラフ (R39)

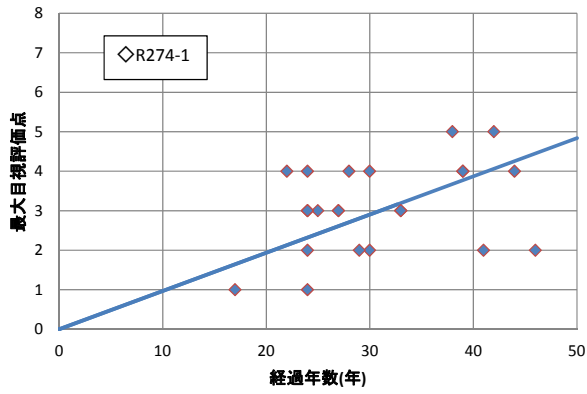


図-11 10年毎の最大目視評価点を求めるために作成した直線グラフ (R274)

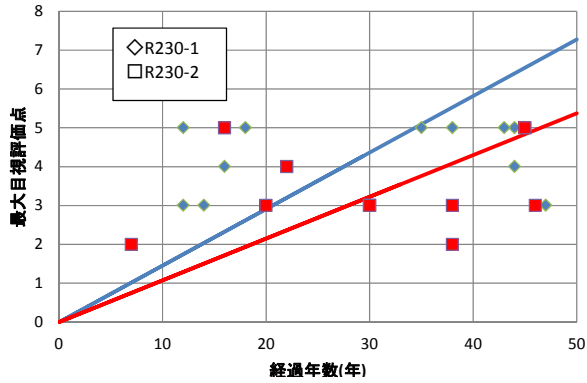


図-12 10年毎の最大目視評価点を求めるために作成した直線グラフ (R230)

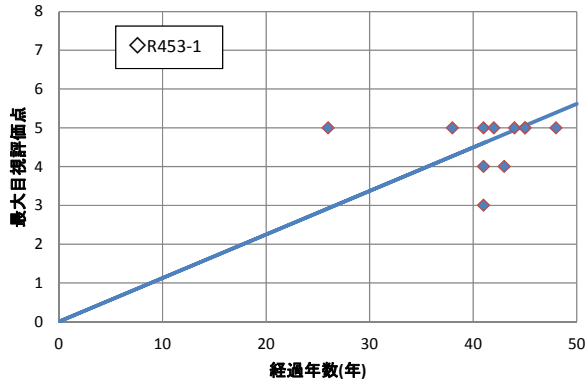


図-13 10年毎の最大目視評価点を求めるために作成した直線グラフ (R453)

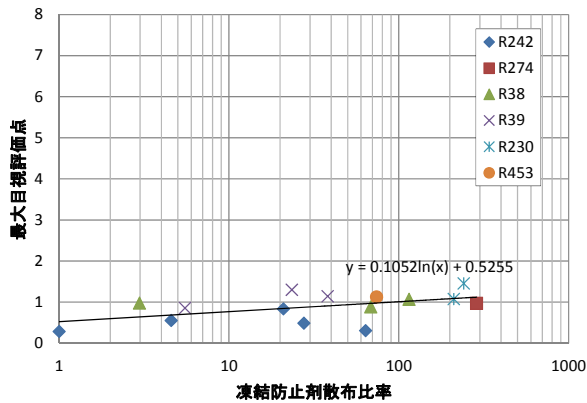


図-14 凍結防止剤散布比率と最大目視評価点(10年経過)

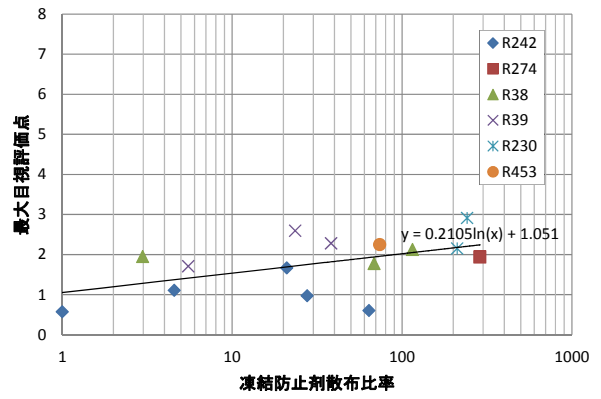


図-15 凍結防止剤散布比率と最大目視評価点(20年経過)

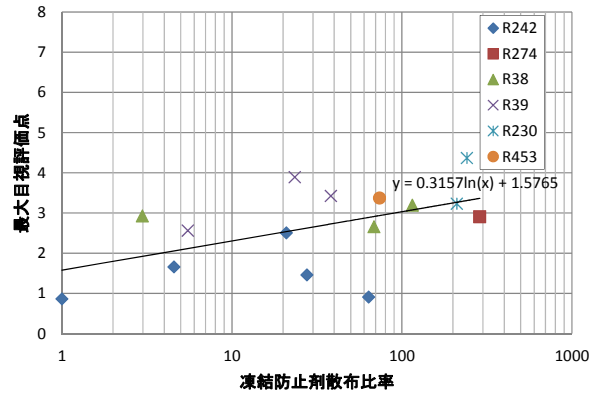


図-16 凍結防止剤散布比率と最大目視評価点(30年経過)

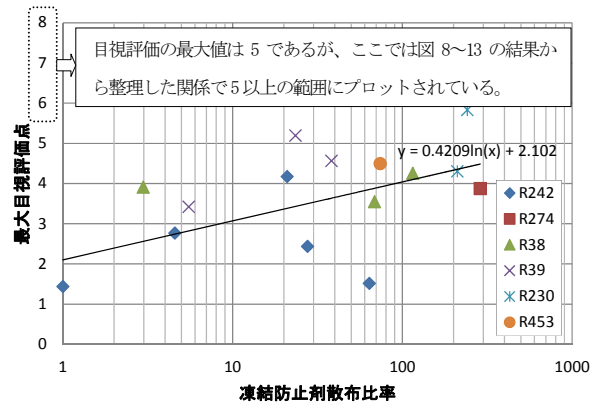


図-17 凍結防止剤散布比率と最大目視評価点(40年経過)

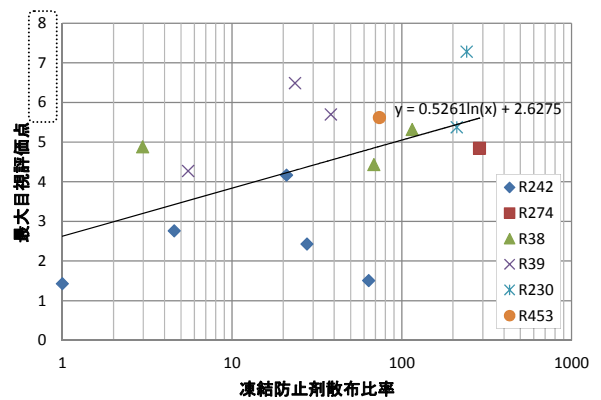


図-18 凍結防止剤散布比率と最大目視評価点(50年経過)

## (2) 凍害ひび割れ

表面走査法より求めた深さ方向における相対動弾性係数( $RE_d$ )の予想下限の推定値をヒストグラムで整理した。結果を図-19~20に示す。なお、これらの値は先に述べたように、相対動弾性係数の真値ではなく、真値がプロットされると予想される領域の下限値であることを強調しておく。ここでは、傾向を路線毎に把握しやすいようにするため、折れ線グラフの形で示した。いずれの路線及び深さにおいても、予測下限値の最頻値は、40~60%の範囲に出現した。このことから、今回調査した道路橋下部コンクリートの多くは、100%から概ね40~60%以上の範囲に相対動弾性係数の真値が存在していると推察される。なお、一般国道39号においては、深さ10mmで $RE_d$  30-40に最頻値を記録し、100mmの箇所においても最頻値が $RE_d$  40-50にあり、損傷の程度が比較的大きいことが疑われる傾向が示された。最頻値は全体的に深い位置ほど大きく、凍害ひび割れの程度は表面に近い位置ほど大きいと考えられる。このことは、表面から劣化が進行していることを示しており、環境を含めた外的要因の影響が大きいと想定される。しかしながら、深さ10mmをみると $RE_d$  60-70の割合は一般国道242号よりも一般国道230号が多く、また、 $RE_d$  50-60の割合は一般国道242号よりも一般国道274号の方が多く結果となっており、凍結防

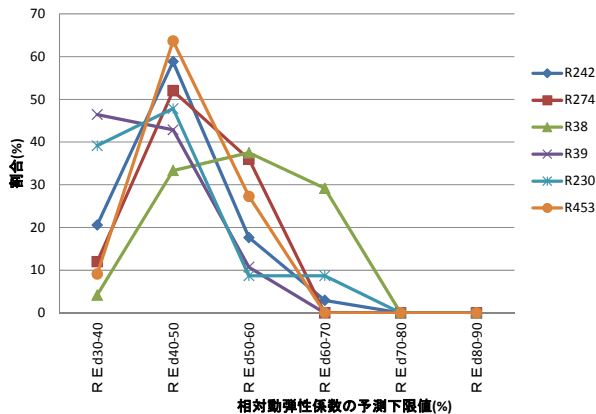


図-19 相対動弾性係数の予測下限値のヒストグラム (深さ 10mm)

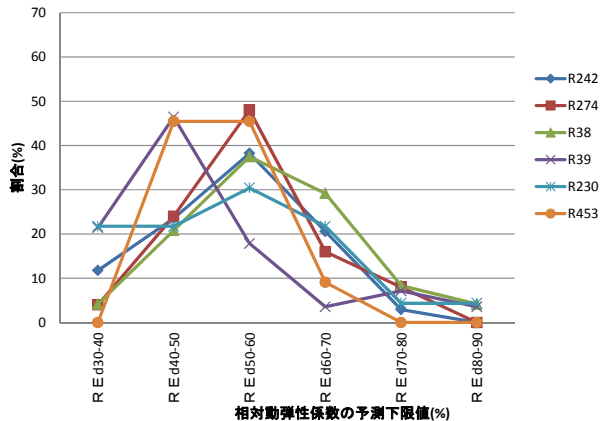


図-20 相対動弾性係数の予測下限値のヒストグラム (深さ 100mm)

止剤の散布量とは対応していない。本調査の範囲では、相対動弾性係数に関しては、凍結防止剤散布頻度の影響がさほど見受けられない傾向が示された。

## 4. まとめ

本研究では評価技術の確立を最終目標に位置づけ、その一環として、スケーリングとひび割れが複合化した凍害の発生実態を把握するため、山間部の道路橋下部コンクリートを対象に目視によるスケーリングの調査と超音波による凍害ひび割れの調査を行った。さらに凍害の程度と環境（凍結融解の厳しさ、凍結防止剤の散布頻度）の関係について考察を行った。本調査の範囲で得た知見をまとめると以下ようになる。

- (1) 供用0~50年の範囲では、年数を経るにつれスケーリングが進行していく傾向にある。
- (2) 凍結防止剤散布割合が大きいほどスケーリングの程度は大きい傾向が認められる。
- (3) 相対動弾性係数に関しては、凍結防止剤散布頻度の影響が大きく見受けられない傾向が示された。

これまでの調査の範囲において、塩化物系凍結防止剤散布の影響がコンクリート構造物の劣化進行に影響をもたらす可能性があることが示された。今後は、さらに凍害危険度が2の領域まで調査範囲を拡大し、凍害の発生の実態をより詳細に調べていく予定である。

積雪寒冷地域における冬期路面管理に欠かすことが出来ない凍結防止剤散布は、今後も引き続き行われ、コストパフォーマンスが高い塩化物系凍結防止剤の使用は継続されると考えられることから、今後もコンクリート劣化についての傾向把握に向けてデータの蓄積を図り、適切な対策手法の確立に向け研究をする必要がある。

## 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) 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要集、2012. 2
- 3) American Society for Testing and Materials：Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals
- 4) 遠藤裕丈、田口史雄、林田宏：コンクリート部材の凍害診断への表面走査法の適用に関する研究、第 55 回 (平成 23 年度) 北海道開発技術研究発表会発表要集、2012. 2
- 5) 柏忠二、明石外世樹、小阪義夫：コンクリートの非破壊試験法一日欧米の論文・規格・文献一，p.42，1980.