

報告 コンクリートの凍害および塩害による複合劣化に関する調査

田口 史雄^{*1}・小尾 稔^{*2}・遠藤 裕丈^{*3}

要旨：北海道におけるコンクリート構造物は厳しい環境下に曝されており，その使用条件によっては，凍害と塩害の複合劣化（以下複合劣化と称す）の被害を受ける場合がある。これまで凍害や塩害単独による構造物劣化状況に関する報告は多くされているが，複合劣化についての調査は少ない状況であった。今回，沿岸・海岸の海水や凍結防止剤散布による影響を受ける箇所において，複合劣化に着目した調査を行なったので，その状況について報告する。

キーワード：凍害・塩害複合劣化，スケーリング，海水，凍結防止剤，現地劣化状況評価

1. はじめに

北海道のコンクリート構造物は，**図-1**に示す凍結融解に加えて沿岸・海岸部では海水による塩分供給という厳しい環境下に曝されている¹⁾²⁾。

また，1991年4月からスパイクタイヤ粉じんの発生の防止に関する法律の施行に伴い，冬期スリップ事故防止対策として様々な凍結防止剤等が検討・開発されてきた。しかし，現段階では効果や持続性・経済性等に優れている理由から，塩化物系凍結防止剤が主に散布され（**図-2**参照），内陸部においても塩分環境下になっている。

このためコンクリート構造物は海水や凍結防止剤（**写真-1**）による塩害と凍害の複合作用を受け，スケーリング劣化（**写真-2**）を起こすことが多い。

今回，沿岸・海岸コンクリート構造物等および塩化物系凍結防止剤散布箇所のコンクリート橋の複合劣化に関して，代表的劣化症状であるスケーリングに着目して，目視により現地コンクリート構造物を評価した。その結果，沿岸・海岸部においては海水，内陸部においては塩化物系凍結防止剤と凍害による複合劣化が生じており，沿岸部の塩害の地域区分（以下塩害区分と称す）や塩化物系凍結防止剤散布箇所の散布量とコンクリート劣化程度については巨視的に

相関がみられること，また塩化物系凍結防止剤散布箇所の橋梁部位ごとの塩分濃度測定結果から塩分を含んだ融雪水に曝される部位において濃度が高く複合劣化のスケーリングが進行していることがわかった。

さらにその橋梁の鉄筋発錆までの期間について試算した結果を報告する。

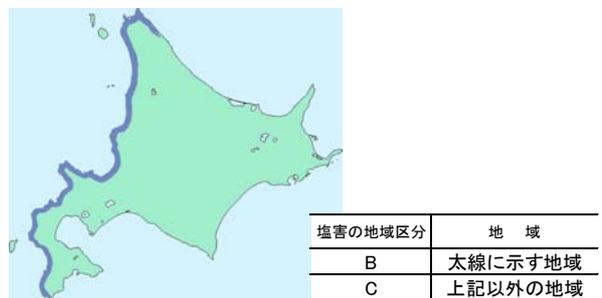
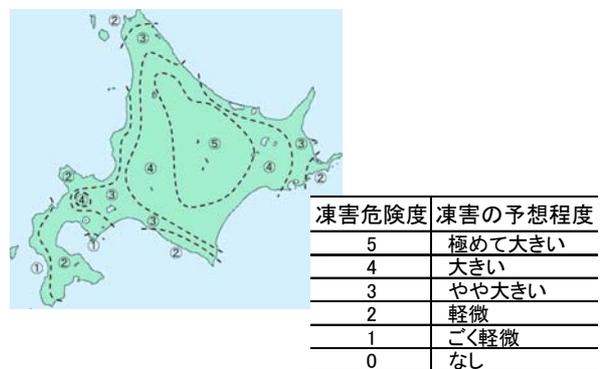


図-1 凍害危険度及び塩害の影響度合いの地域区分図^{1) 2)}

*1 (独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ耐寒材料チーム 上席研究員 (正会員)

*2 国土交通省北海道開発局室蘭開発建設部 企画課設計審査係 係長 (正会員)

*3 (独) 土木研究所寒地土木研究所 寒地基礎技術研究グループ耐寒材料チーム 研究員 (正会員)

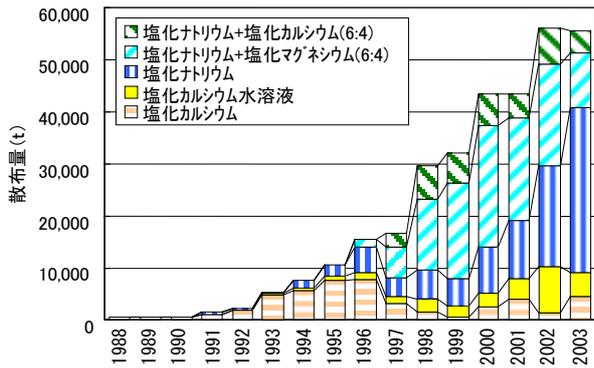


図-2 北海道の国道(在来、高規格)の凍結防止剤散布量(1988年～2003年)



写真-2 凍害・塩害複合劣化による橋梁地覆コンクリートのスケーリング



写真-1 海水や凍結防止剤による塩分供給環境

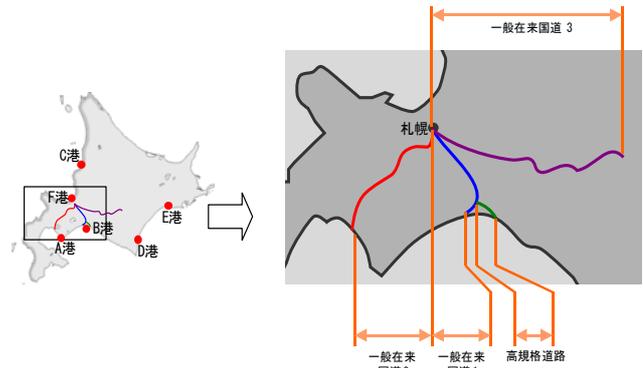


図-3 調査箇所

2. 現地調査概要

2.1 調査箇所及び調査項目

凍害・塩害の複合劣化調査は図-3に示す供用12～16年及び40年経年した北海道内の6港の海岸コンクリート防波堤のエプロン部分と塩化物系凍結防止剤が散布されている一般在来国道3路線170橋と高規格道路1路線13橋の計183橋について行った。

調査項目はコンクリート構造物の供用年数、ASTM-C-672-91の室内試験評価に準じた点数による現地コンクリート構造物のスケーリングによる劣化状況評価(以下評価点と称す)、外部環境(凍害危険度、沿岸部の塩害区分または塩化物系凍結防止剤散布箇所においては補正散布量…3.1(2)の式(1)参照)、さらにそのうち特定したコンクリート橋梁において、部位ごとの塩分イオン量測定とスケーリング状況の関係、一部位において塩化物イオンの拡散予測を行った。

表-1 ASTM試験による劣化状況評価

評価点	表面の劣化状況
0	剥離なし
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

2.2 調査方法

ASTM-C-672-91の室内試験におけるスケーリング劣化の目視評価のグレードを表-1に示す³⁾。

また、この評価点に準拠した目視判断基準例を写真-3に示す。

3. 現地調査結果

3.1 現地構造物表面の劣化状況

(1) 海岸コンクリート防波堤

表-2に示す6港のうちC港のみ施工後40年、他は12～16年経過したコンクリートである。評価した防波堤エプロン部分については構造物が大きいことから、部位ごとにより劣化状況は差

が大きく見られた。また今回の調査では、施工後 40 年程度経過したデータ数が小さいため 12～16 年経過（表-2C 港以外）のエプロン部分における外部環境による差を検討した。凍害危険度は 0～5 まで 6 段階評価とした。また、塩害区分は道路橋示方書の基準ではあるが、塩害区分がきびしい地域は飛来塩分の起因となる波浪や越波等もきびしいと判断し海岸コンクリート防波堤の塩分供給量の大きさをあらかず因子として活用した。A=3（北海道該当無）、B=2、C=1 として、凍害危険度との重みバランスを取るため 2 倍してこれらの平均的影響を検討するため平方根した値と経年、評価点の関係（図-4）から検討を加えた。

この結果、図-4 から明瞭ではないが経年が進むほど劣化度が上がる傾向、塩害区分や凍害危険度が厳しいほど複合劣化状況の評価点が大きくなる傾向がみられた。さらに表-2 から塩害区

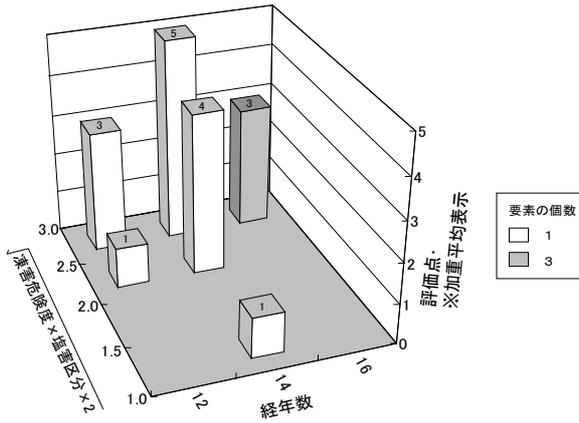
分 B の方が C と比べて凍害危険度が小さめにもかかわらず劣化の程度を示す評価点が 4～5 と大きくなっている傾向が、また塩分区分 C においては、凍害危険度が大きいほど評価点が大きくなる傾向がみられた。これからは塩分環境についてはエプロン部分においては、飛来塩分による供給量は図-1 に示す日本海側が厳しくその起因となる波浪や越波やその滞留による影響、また凍結融解に関しては同じく図-1 の凍害危険度が影響度合として関与して複合劣化していると考えられる。なお今回参考として、剥離面に方形枠（50cm×50cm）を据付け、枠内の剥離部分の面積率とその剥離部分の平均深さ（10 点測定）を乗じた積で算出した剥離度を表-2 に示しているが、評価点が大きくなると剥離度も大きくなっていることがわかる。しかし、データ数がないことから今後さらに調査を進め傾向を把握する必要がある。また、構造物の規模が大きく箇所により施工年も多少違うため、個別部位ごとの水セメントなど配合の影響も考えられたことから、その件に関しては別調査⁴⁾において影響の検討を行っている。なお、40 年経過した防波堤は他の 10 年より凍結融解と塩化物の供給による凍害と塩害の複合劣化が経年により更に促進されている傾向がみられた。

写真-3 劣化状況評価写真例

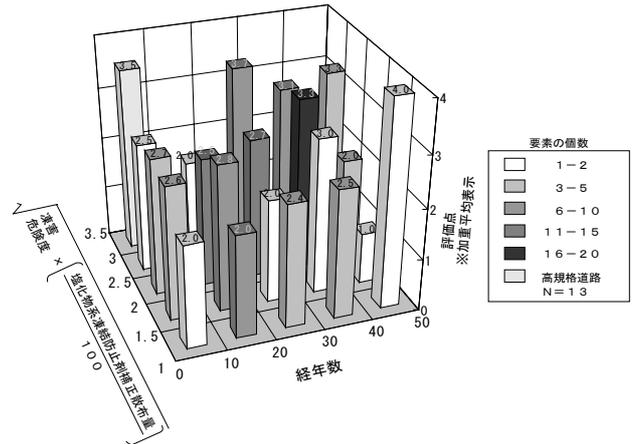
ASTM試験による劣化状況評価(ASTM-C-672-91)			
評価点	表面の劣化状況	評価点	表面の劣化状況
0		3	
1		4	
2		5	

表-2 防波堤エプロン部分劣化状況評価

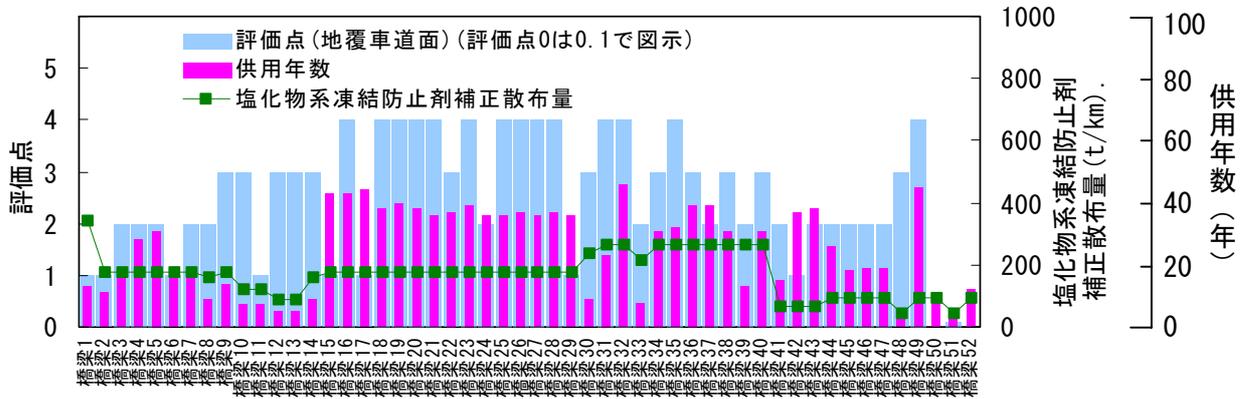
評価点	写真	港名	経過年数	剥離度 (mm)	凍害危険度	塩害区分	評価点	写真	港名	経過年数	剥離度 (mm)	凍害危険度	塩害区分	評価点	写真	港名	経過年数	剥離度 (mm)	凍害危険度	塩害区分
1		A港	14	0.11	1	C	2		D港	16	2.57	4	C	4		C港	40	5.03	2	B
		B港	12	0.26	3	C			D港	16	3.20	4	C			D港	16	5.61	4	C
		C港	40	0.42	2	B	3		E港	12	4.30	4	C			C港	40	6.64	2	B
		B港	12	0.48	3	C			D港	16	4.95	4	C			F港	14	8.63	2	B
		B港	12	0.66	3	C		4		B港	14	5.01	3		C	5		C港	40	24.1
															C港		40	30.9	2	B



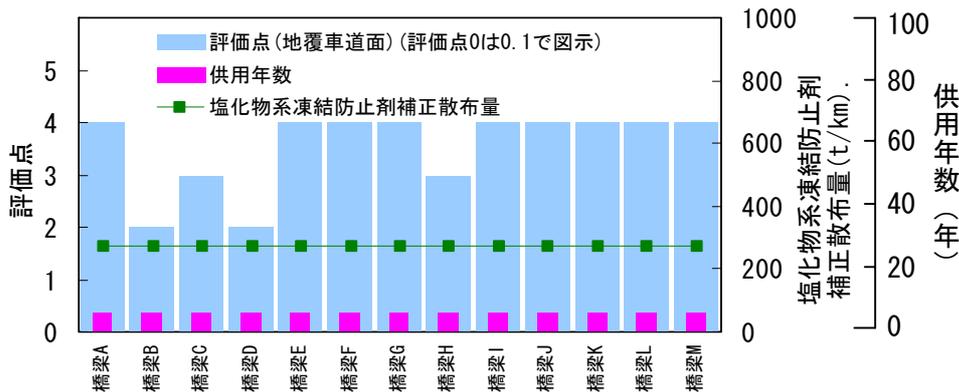
図一4 外部環境（凍害危険度、塩害区分）および経年が劣化状況に与える影響傾向



図一5 外部環境（凍害危険度、塩化物系凍結防止剤散布量）および供用年数が劣化状況に与える影響傾向



図一6 一般在来国道のスケーリング劣化状況



図一7 高規格道路のスケーリング劣化状況

(2) 塩化物系凍結防止剤散布箇所コンクリート橋

一般在来国道と高規格道路の計 183 橋の複合劣化調査に関して現在、塩化物系凍結防止剤の散布量はある一定区間ごとでしか把握できてい

ないが、海岸コンクリート防波堤と同様にスケーリング劣化状況評価（評価点）について経年数、外部環境（塩化物系凍結防止剤散布量、凍害危険度）による差を検討した。なお、塩化物系凍結防止剤の散布量については個別構造物

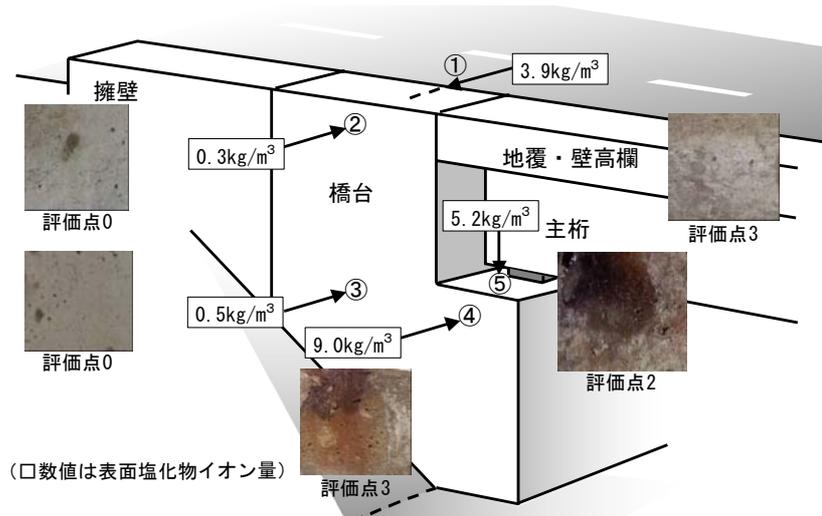


図-8 高規格道路橋梁下部における表面塩化物イオン量 分布状況例 (S 跨道橋下部工橋座付近)

地点毎に散布されていないことから、路線を一定区間に区切った散布量実績を用いて式(1)から推定した。

$$\begin{array}{l} \text{塩化物系凍結防止剤} \\ \text{補正散布量} \end{array} = \sum_{1997}^{2003} \alpha \cdot \beta \quad (1)$$

α = 各年度の道路管理事務所等の塩化物系凍結防止剤総散布量

β = 別調査による道路管理事務所等の総散布量に対する路線一定区間毎の散布比率 (%)

また、塩化物系凍結防止剤補正散布量は km 当り 100t 単位の量であることからデータの重みバランスを図るため 1/100 数値とした。図-5 から巨視的には経年により劣化度が上がる傾向、塩化物系凍結防止剤補正散布量が多く凍害危険度が厳しいほど複合劣化状況の評価点が大きくなり複合劣化が進み易い傾向がみられた。しかし、図-6 に示す一般在来国道事例のように、個々にデータを比べてみると逆転が生じていたり、同程度のようなデータもあることから、今後は更に散布量の詳細調査や除雪などによるコンクリート表面の露出状態や日当たり、融雪水の水当たりや浸水状況等の環境状況も詳細に調査を行っていく必要がある。また、高規格道路では

図-7 に示すように供用年数が短い割に評価点が高くスケリング劣化が進んでいる傾向がみられる。これは路面管理の維持水準が一般在来国道に比べて高いため、除排雪や凍結防止剤散布が多いことさらに路面の露出状態が多いため併せてコンクリート部材の露出も多く外気や塩分環境以下での湿潤に曝される状態が多く、凍結融解と塩化物イオンの複合影響を受けやすいためと推定される。

3.2 複合劣化における塩化物イオン浸透予測例

図-8は供用後6年経過した高規格道路の橋梁(S 跨道橋)下部工の部位ごとにおける表面塩化物イオン量の分布状況を示している。同一構造物においても、凍結防止剤やそれを含む融雪水が流れる経路に当たる部位、例えば地覆部分、橋梁ジョイント直下の橋台フーチングでの天端や側面で高い塩化物イオン量となっていること、評価点が高く表面の劣化も進んでいることがわかった。

また、図-9は図-8の高規格道路の橋梁下部工橋④部の塩分浸透量調査結果に基づき、塩化物イオンの浸透状況を予測した結果である。なお、塩化物イオンの浸透状況の予測は、式(2)に示すフィックの拡散方程式を利用した。採取コアの各深さにおいて、JIS A1154により測定した塩化物イオン量と式(2)から計算した値の差が最

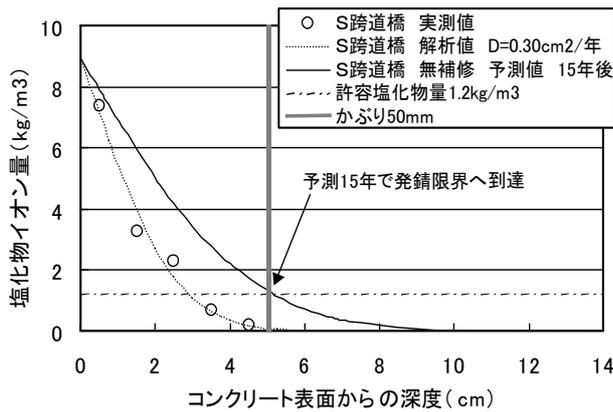


図-9 塩化物イオンの浸透状況予測
(S 跨道橋下部工橋座付近)

小となるように、最小 2 乗法を用い繰返し計算法によって回帰分析を行い、式の表面における塩化物イオン量と塩化物イオンの見かけの拡散係数を算定した。さらにその結果を代入した式(2)を用いて任意の深さにおける任意の時刻の塩化物イオン量を求めて、浸透状況予測を行なった。

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

$C(x, t)$: 深さ x (cm), 時刻 t (年) における塩化物イオン量 (kg/m^3)

C_0 : 表面における塩化物イオン量 (kg/m^3)

D : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

erf : 誤差関数

この予測計算によると、今後約 15 年でかぶり位置の塩化物イオン量が鉄筋発錆許容限界値 1.2kg/m^3 に達する状況下にある。このように凍結防止剤を含む融雪水の流路においては、その塩分と凍結融解による複合作用により劣化が促進されていることがわかる。

4. まとめ

今回の沿岸・海岸の海水や塩化物系凍結防止剤による影響を受ける箇所において、複合劣化に関する調査を行なった結果、以下の状況がみられる。

(1) 海岸コンクリート防波堤における今回の調査では、部位ごとによる複合劣化状況の差が大きいが、おおよそ塩分供給（塩害区分）や凍結融解（凍害危険度）、経年数の影響を受ける傾向がみられた。

(2) 塩化物系凍結剤散布箇所においても、巨視的にみてスケーリング劣化は散布量、凍結融解（凍害危険度）、経年数の影響を受けている傾向がみられた。特に高規格道路では、経年数の小さい割に劣化が大きい、これは路面水準を高めるため凍結防止剤散布量が多いこと、路面露出水準が高いことに伴ったコンクリート部材の露出が多いことに起因して外部環境の影響を直に受けやすいことも関与していると考えられるが、今後さらに使用環境や外部環境との関係を詳細に把握する調査が必要と考える。

(3) 同一コンクリート構造物においては、凍結防止剤を含む融雪水の流路となっている部位ほど塩化物イオン濃度が高く、スケーリング劣化が大きいことが判明した。

(4) 凍結防止剤による塩化物濃度が高い部位の塩化物イオンの浸透予測によると短期間で発錆限界に達するため塩害・凍害複合劣化対策が必要である。

参考文献

- 1) 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，技法堂出版，pp79 - 80, 1988
- 2) 道路橋示方書・同解説 I 共通編 III コンクリート橋編，日本道路協会，pp171 - 175, 2002.4
- 3) American Society for Testing and Materials : Standard test method for scaling resistance of concrete surfaces exposed to deicing chemicals, ASTM Standard C672, Annual Book of ASTM Standards , Vol.04.02 , pp.341-343
- 4) 遠藤裕丈，田口史雄，嶋田久俊ほか：約40年を経た寒冷地コンクリート防波堤での複合劣化（塩分と凍結融解）調査，北海道開発土木研究所月報，pp17 - 27, 2005.12