

凍結融解と塩化物の複合作用を受けるコンクリートの耐久性設計および維持管理に関する研究

国立研究開発法人土木研究所
寒地土木研究所
寒地保全技術研究グループ
耐寒材料チーム 主任研究員
遠藤 裕丈



1 はじめに

冬期間、車両の走行安全性を確保するために塩化系の凍結防止剤が散布される道路橋では、写真1に示すスケーリングを目にすることがあります。スケーリングは、コンクリート表面がフレーク状に剥がれる形の凍害です。スケーリングの進行は部材断面の欠損や鋼材露出に繋がり、ひいては部材の耐久性低下に至ります。

凍結融解環境下において、濃度が数%の塩水がスケーリングを促進させることは広く知られています。この理由については、今日までに様々な説が提唱されています。例えば図1は、コンクリート表面に溶液が存在しないとスケーリングは発生しないと提唱するValenza¹⁾ の説です。表面と接する塩水は、凍結すると氷としてコンクリート表面



写真1 道路橋地覆のスケーリング

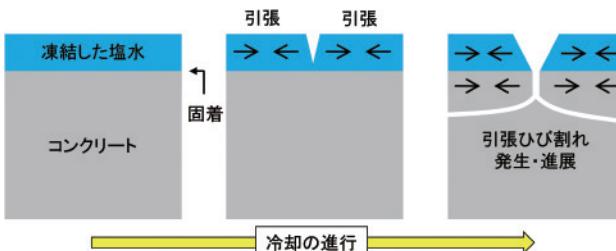


図1 Valenzaの塩水によるスケーリング促進概念¹⁾

と固着し、その氷は冷却が進むと収縮しますが、塩化物を含む氷の収縮量は一般の氷に比べると大きいため、コンクリート表面に引張応力が作用しやすく、その結果、スケーリングに繋がるひび割れがコンクリート表面近傍に多く発生すると述べています。一方、赤堀²⁾ の説ではコンクリート組織の塩分濃度が高まると、組織内に氷晶と未凍結水が複雑に混在する状態が形成され、未凍結水が氷晶へ引き寄せられて氷晶が膨張成長する現象が随所で発生し、その結果、ひび割れが進展してスケーリングが促進されると述べています。

本報では、こうしたスケーリングに対するコンクリート構造物の合理的な維持管理に資する設計・診断手法や対策の提案に向けて寒地土木研究所が行っている研究の中から、①凍結防止剤散布路線における暴露実験、②スケーリングの進行予測、③シラン系表面含浸材による劣化の抑制対策について紹介します。

2 凍結防止剤散布路線における暴露実験

凍結防止剤の散布量や気温など環境因子とスケーリングの進行との関係を明らかにするため、暴露実験を



写真2 暴露実験の様子(北海道内20箇所で実施)

行っています。写真2は暴露実験の様子です。これまで2冬経過しています。コンクリート供試体は、路面への設置は車両走行の障害となるため道路橋の排水管の真下に設置し、垂れ落ちる路面融雪水を打設面に与えています。

写真3は、暴露1冬を経たスケーリング発生状況の一例です。フレッシュコンクリートの実測空気量は4.1～5.0%です。現場によっては、この1冬だけでもスケーリングが大きく進行していました。コンクリートの配合面では、水セメント比(W/C)が小さいコンクリートほど、スケーリングは少ない傾向にあります。さらに、水セメント比が同じコンクリートを見比べると、高炉セメントB種を使用した方が、普通ポルトランドセメントを使用した場合よりも多くスケーリングしています。これは、図2に示すように、高炉B種を使用することでコンクリート内部組織の透水性が低下し、脆弱な打設面の表層に供給された塩水が深部へ流動しにくくなることで、表層に未凍結水が集中して水圧が高まり、スケーリングが促進された³⁾と考えられます。なお、このことは、普通ポルトを使用したコンクリートが全体的に飽水しやすく、そのため劣化が遅れて顕在化するといった可能性もあることから、引き続き注視する予定です。

図3は、各道路橋の凍結防止剤散布車の出動回数と

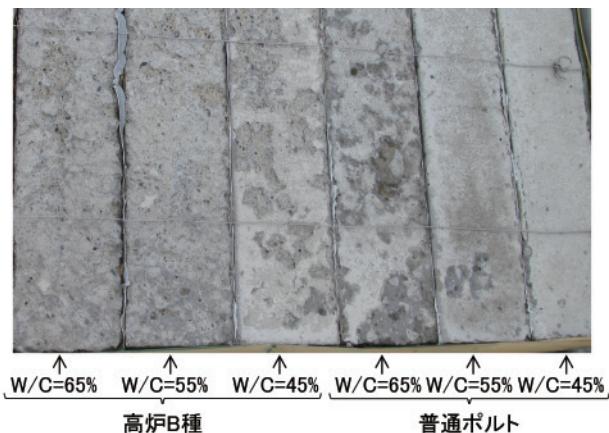


写真3 暴露1冬を経たスケーリング発生状況の一例

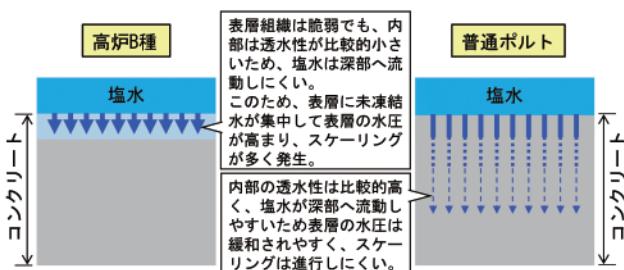


図2 スケーリングの進行に及ぼすセメントの影響³⁾

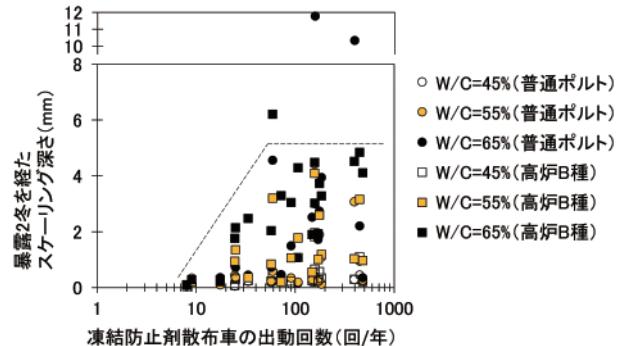


図3 凍結防止剤散布車の出動回数と暴露2冬を経たスケーリング深さの関係

暴露2冬を経たコンクリートのスケーリング深さ(元のコンクリート表面からスケーリング発生後の表面までの距離)の関係です。北海道の一般国道では、道路橋、カーブ、交差点など特に滑りやすい箇所で凍結防止剤が重点的に散布されています。このため、散布環境については、路線1kmあたりの散布量(t/km)で表すことが難しい理由から、出動回数で表現しました(往復散布1回を出動1回)。この図をみると、出動回数が約50回/年未満の地域は出動回数が多いほどスケーリング深さが増える傾向にあり、約50回/年以上の地域では、出動回数とスケーリング深さに明確な関係はみられないことがわかります。

なお、参考までに、道路橋に散布された凍結防止剤の総量を橋長で除して橋長1kmあたりの散布量を調べたところ、出動回数50回/年の道路橋は7.3t/kmでした。

図4は、11～4月の日最低気温の平均と暴露2冬を経たコンクリートのスケーリング深さの関係です。出動回数50回/年以上のプロットをみると、概ね日最低気温の平均が低い地域ほどスケーリング深さが大きい右肩下がりの傾向となっていることがわかります。この図から、スケーリングの進行に及ぼす環境因子として凍結防止剤散布車の出動回数と冬期の日最低気温は重要な指標であること、また、水セメント比の低減はスケーリングの抑制に効果的であると言えます。

これらの知見は、地域によって異なる凍結防止剤の散布量や冬期の最低気温に応じた弾力的な配合設計の実現および対策要否の判定に資すると考えています。

3 スケーリングの進行予測

コンクリート構造物の寿命評価、対策工の要否判定、ライフサイクルコストの算出を適切に行うには、実測データから将来予測を行う劣化予測式が必要です。

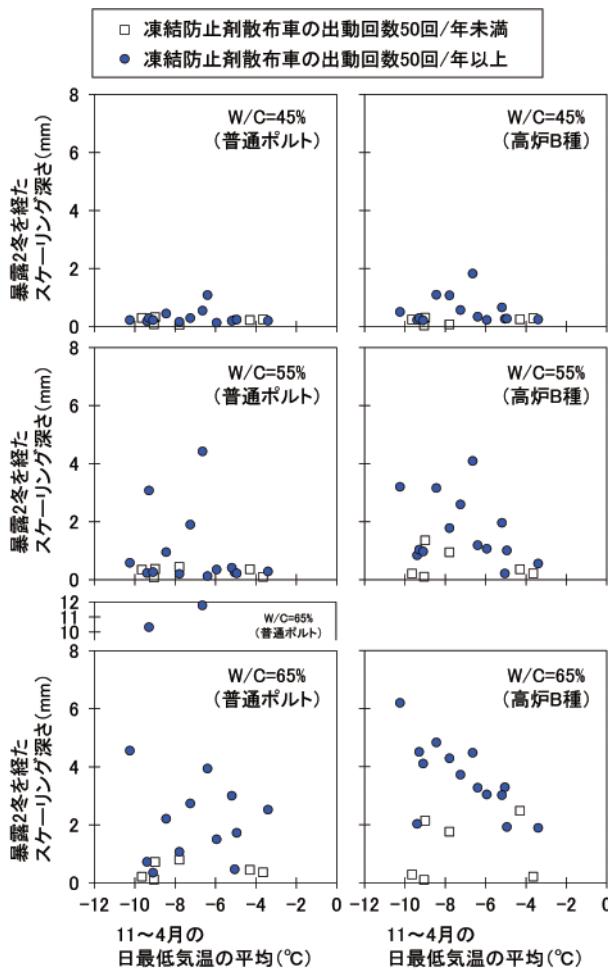


図4 11～4月の日最低気温の平均と暴露2冬までのスケーリング深さの関係

中性化、塩害、化学的侵食の劣化予測式は既往のものがありますが、凍害についてはまだなく、本研究においてこれまでに取得した多くのデータを解析・整理し、図5に示す、スケーリングの経時変化を定量的に評価するスケーリング進行予測式を開発しました。この成果は「2018年制定コンクリート標準示方書[維持管理編]改訂資料」(土木学会)、「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針・同解説」(日本建築学会)、「北海道におけるコンクリート構造物の性能保全技術指針」(北海道土木技術会コンクリート研究委員会)などで紹介されています。また、寒地土木研究所耐寒材料チームのホームページでは、実測データからスケーリング進行予測式の各係数を導出するExcelプログラムを無料で公開しています⁴⁾。スケーリング進行予測式は、係数が1つではないため現在のところ各係数を得るには複数のデータ(複数年に亘る調査結果)が必要となります。今後、配合、散布車の出動回数、冬期の日最低気温の3要素と、スケーリング進行予測

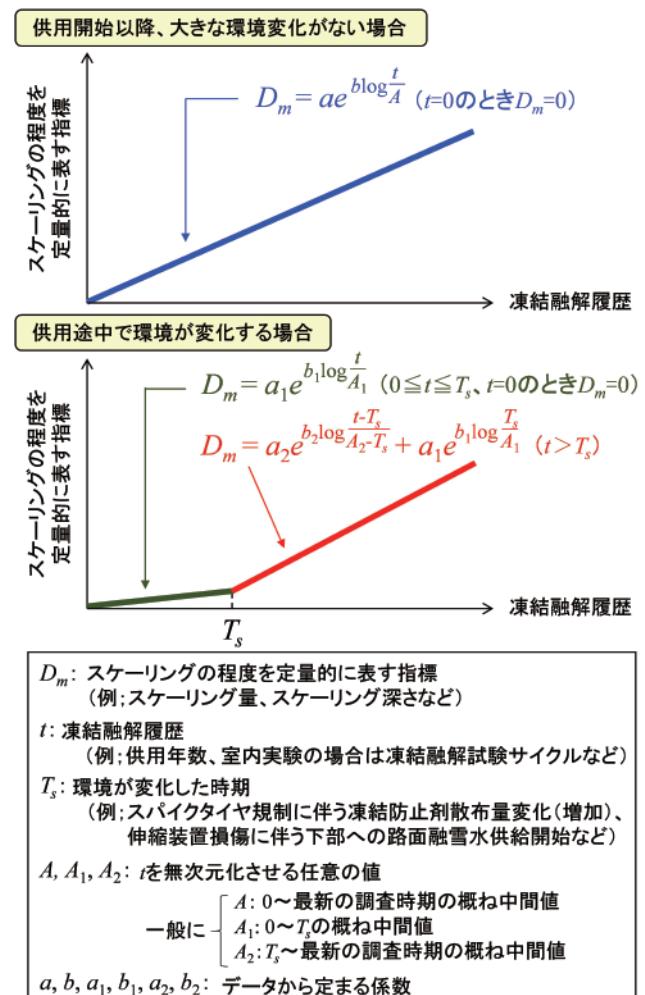


図5 開発したスケーリング進行予測式

式の係数との関係を整理できれば、耐久性設計に対する使い勝手の向上に繋がります。スケーリングが進行している既設部材の劣化予測や、補修部位の優先順位付けで活用されればと考えています。

また、実験室において t を凍結融解試験サイクルとしたスケーリング進行予測式、現場において t を供用年数としたスケーリング進行予測式を求め、2つの式を連立させることで、実験室での凍結融解1サイクルが現場の何年分に相当するかを把握することもできます。なお、係数に及ぼす部位の違いや水掛かりの程度の影響については未解明で、引き続き検討を続けたいと考えています。

4 シラン系表面含浸材による劣化の抑制対策

北海道開発局では凍結防止剤による劣化の抑制対策として、路面水の飛沫を受けやすい道路橋地覆にシラン系表面含浸材を塗布しています⁵⁾(写真4)。この材



写真4 地覆へのシラン系表面含浸材塗布



写真5 吸水防止層(コア側面に水を噴霧)

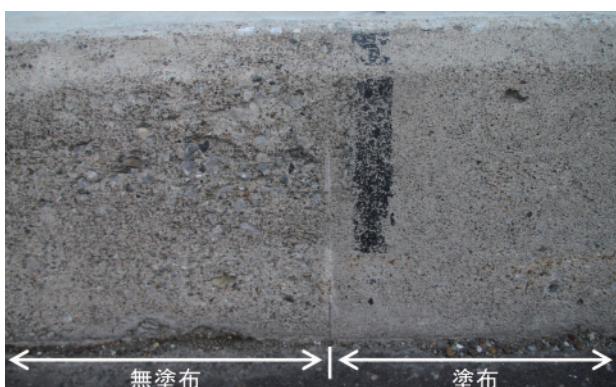


写真6 塗布15年後のA橋地覆の状況

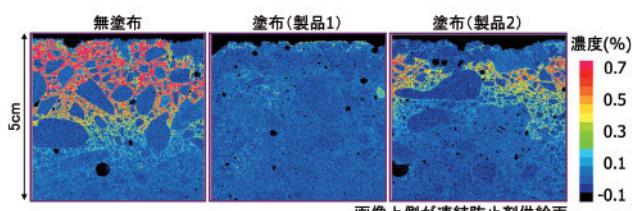


図6 塗布10年後のB橋地覆の塩化物イオン分布

料は、コンクリートの表面や空隙内壁に撥水機能を持つ疎水基を固着させ、表面近傍に吸水防止層を形成し(写真5)、水や塩化物イオンの侵入を抑える浸透性の保護材です。

長所として、①施工が簡便、②比較的安価、③無色透明で施工後も目視点検が可能、④改修時の産廃物が少ない、などが挙げられます。塩水との接触が抑えられることでスケーリングや塩害の進行遅延効果が期待されますが、寒冷環境下での効果の持続性に関する情報が少ないため、追跡調査を行っています。これまでの調査で、製品を適切に選定、施工することで少なくとも10～15年以上はスケーリングや塩化物イオン侵入の遅延効果が期待できることがわかりました(写真6、図6)。今後も追跡調査および適切な塗布方法に関する検討を続ける予定です。

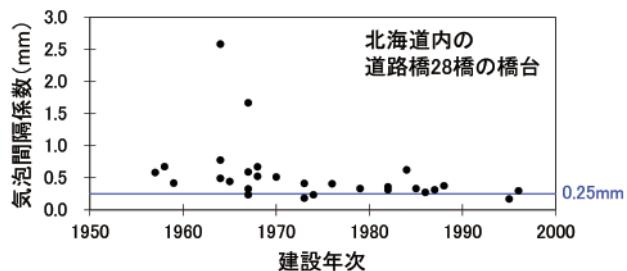


図7 建設年次と気泡間隔係数の関係

5 おわりに

図7は北海道内の道路橋28橋で調べた建設年次と気泡間隔係数(気泡間の距離を表す特性値)の関係です。水の凍結膨張によるひび割れを抑えるにはAE剤を使用して微細な気泡を導入する方法が効果的で、気泡間隔係数が0.25mmを下回ると耐凍害性は著しく向上することが知られています。北海道では凍害に対する意識が長年に亘り着実に高まってきたことが伺えます。

1991年にスパイクタイヤの使用が規制され、凍結防止剤の散布量が増加に転じて以降、単純な水の凍結膨張によるひび割れとは形態の異なる、凍結融解と塩化物の複合作用によるスケーリングを多く目にすることになりました。今後も凍害に対する意識を持ち続け、このような環境下でのコンクリートの合理的な維持管理に資する設計・診断・対策の提案に向け、研究を進める所存です。

【参考文献】

- 1) Valenza II,J.J.and Scherer,G.W. : Mechanism for Salt Scaling,J.Am.Ceram.Soc.,Vol.89,No.4,pp. 1161-1179,2006.
- 2) 赤堀弥生,名和豊春 : スケーリング劣化に関する一考察,コンクリート工学年次論文集,Vol.30,No.1,pp.885-890,2008.7
- 3) 遠藤裕丈,田口史雄,嶋田久俊 : スケーリング劣化の予測に関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.27,No.1,pp.733-738,2005.6
- 4) http://zairyō.ceri.go.jp/ceri_zairyō/topics5/scalingpr-dr.html(耐寒材料チームホームページ)
- 5) 平成31年度北海道開発局道路設計要領,第3集橋梁,第2編コンクリート,参考資料B「道路橋での表面含浸材の適用にあたっての留意事項」,2019.4