

マルコフ連鎖モデルを用いたコンクリート構造物の凍害の進行性評価

(独)土木研究所 寒地土木研究所 正会員 ○川村 浩二

(独)土木研究所 寒地土木研究所 正会員 遠藤 裕丈

国土交通省北海道開発局 網走開発建設部 非会員 葛西 隆廣

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の合理的な耐久性設計ならびに効率的な維持管理の実践に資する耐久性評価技術の開発が急務となっている。北海道の道路コンクリート構造物は厳しい寒冷環境下に曝されており、冬期は凍結融解に加えて、凍結防止剤(多くは塩化物系)の影響も受けやすい。このような環境下では凍結融解と塩化物の複合作用によるスケーリングの促進が懸念される。なお、凍結融解の厳しさや凍結防止剤散布量は地域によって異なるが、これら環境条件の相違が凍害の進行に及ぼす影響についてはまだ定量的に整理されていない。そこで、実態に即した凍害の進行予測技術の提案に向け、凍害危険度3~5の山間部に位置する道路橋を対象に目視によるスケーリング調査を実施するとともに、凍害の進行性と凍害危険度および凍結防止剤散布頻度の関係について、マルコフ連鎖モデル¹⁾を用いて確率論的に評価した。

2. 調査概要

図-1に凍害危険度マップ²⁾を示す。このマップは、長谷川が全国の気象官署の資料をもとに我が国におけるコンクリートの凍害の危険性を地域ごとにグレード分けしたものである。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。ここでは凍害危険度と凍結防止剤の散布量に着目して調査対象の道路橋を選定した。選定した道路橋の数は、凍害危険度5エリアから86橋、凍害危険度4エリアから52橋、凍害危険度3エリアから34橋の計172橋である。起点側および終点側の路面から流下する凍結防止剤を含む融雪水の影響を受けやすい橋台において目視によるスケーリング調査を行った。ここでは1橋台当たり橋台両側面と正面の3面、1道路橋当たり6面において図-2に示すASTM C 672の基準³⁾に準じた目視調査を行った。点数が最も大きい面の値(以下、最大目視評価点と記す)をその道路橋の評価点とした。また、凍害の程度と凍結防止剤の関係を考察するため、各道路橋における橋長1m当たりの累積凍結防止剤散布量を調べた。北海道内における一般国道での凍結防止剤散布量は、スパイクタイヤ規制を受けて平成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⁴⁾。このことに鑑み、ここでは詳細な散布量が記録されている平成19年度の凍結防止剤散布量のデータを用いて、各調査道路橋における供用から現在に至るまでの大凡の累積散布塩化物イオン量(以下、累積イオン量と記す)を求めた。

凍害の進行に及ぼす環境の影響についてはマルコフ連鎖モデルによる考え方を応用して評価した。マルコフ連鎖モデルによる劣化推移の概念を図-3に示す。ここでは劣化度判定基準を表-1のように定義し、各道路橋で調査した最大目視評価点を式(1)に示すマルコフ連鎖モデルの基本式に代入して劣化度の推移を調べた。

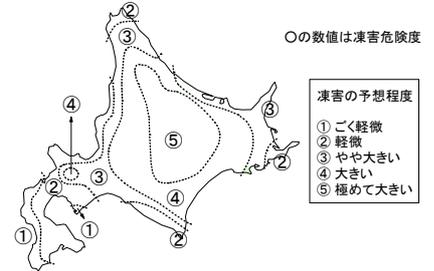


図-1 凍害危険度マップ

点	劣化事例写真	点	劣化事例写真
0	なし	1	骨材の露出し、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	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	骨材が全面露出する程の激しい剥離

図-2 目視評価の基準

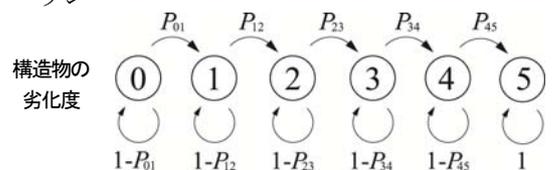


図-3 マルコフ連鎖モデルによる劣化推移の概念

表-1 劣化度判定基準

最大目視評価点	0点	1点	2点	3点	4点	5点
構造物の劣化度	0	1	2	3	4	5

$$\begin{pmatrix} f \\ e \\ d \\ c \\ b \\ a \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-P_{01} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{01} & 1-P_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & P_{12} & 1-P_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{23} & 1-P_{34} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{34} & 1-P_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{45} & 1 \end{pmatrix}^s \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここに f, e, d, c, b, a はそれぞれの劣化度を示す割合、 P_{ij} は推移確率、 s は経過年数を示す。

キーワード コンクリート、凍結融解、凍結防止剤、スケーリング、マルコフ連鎖モデル

〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3丁目1番34号 TEL 011-590-4046 FAX 011-590-4048

3. 調査結果・考察

3-1 凍害と累積散布塩化物イオン量の関係

凍害危険度毎に道路橋を累積イオン量の多いグループと少ないグループに分類し、マルコフ連鎖モデルにより求めた劣化度の推移の比較を凍害危険度毎に行った。図-4、図-5、図-6に凍害危険度3、4、5における結果をそれぞれ示す。経過年数50年における、累積イオン量が少ないグループと多いグループの骨材露出が顕著な劣化度4以上の道路橋の割合を比較したところ、凍害危険度3は21%と46%、凍害危険度4は53%と74%、凍害危険度5は14%と57%となり、いずれにおいても累積イオン量が多いグループの方が割合は高かった。本調査の範囲では、いずれの凍害危険度エリアにおいてもスケーリングの進行性は累積イオン量の影響を受けていることが定量的に示され、耐久性設計を行う際は留意する必要があることが確認された。

3-2 凍害と凍害危険度の関係

累積イオン量が概ね同程度で凍害危険度が異なる道路橋を抽出し、劣化度の推移について比較を行った。なお、累積イオン量は調査した道路橋毎に異なり、今回の調査では凍害危険度3、4、5において同じ累積イオン量同士で比較を行うことが難しかったため、ここでは凍害危険度3と4は累積イオン量が100~400kg/mの道路橋、凍害危険度4と5は0~100kg/mの道路橋を抽出してスケーリングの進行性について比較を行った。累積イオン量が100~400kg/mの凍害危険度3と4における劣化度の推移の比較を図-7、累積イオン量が0~100kg/mの凍害危険度4と5における劣化度の推移の比較を図-8に示す。同じく経過年数50年に着目し、骨材露出が顕著な劣化度4以上の道路橋の割合を凍害危険度毎に比較すると、累積イオン量が100~400kg/mの道路橋においては凍害危険度3が45%、凍害危険度4が84%で凍害危険度4の方が高かった。累積イオン量が0~100kg/mの道路橋においては凍害危険度4が52%、凍害危険度5が49%ではほぼ同程度の値を示したものの、凍害危険度5は劣化度5の道路橋が13%存在する解析結果が示された。本調査の範囲では累積イオン量が同程度の場合、凍害危険度が大きいほどスケーリングは進行しやすい傾向を現場で定量的に確認することができた。

4. まとめ

今回の調査で得たデータをマルコフ連鎖モデルで解析した結果、スケーリングの進行は凍結防止剤に含まれる塩化物イオン量ならびに凍害危険度の影響を受けることを定量的に確認することができた。しかしながら限られた環境条件下での評価であるため、耐久性設計法の確立に向けて今後は調査対象の地域を拡大し、さらにデータの充実・蓄積を図る必要がある。

【参考文献】

- 1) 土木学会：2013年制定コンクリート標準示方書「維持管理編」, p.61, 2013.10
- 2) 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.
- 3) American Society for Testing and Materials : Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals
- 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

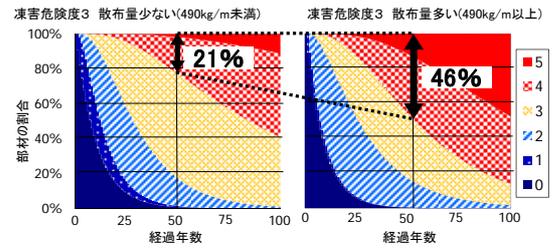


図-4 凍害危険度3における劣化度の推移の比較

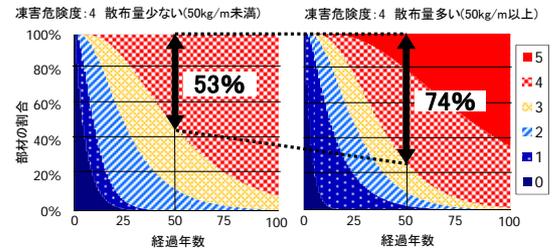


図-5 凍害危険度4における劣化度の推移の比較

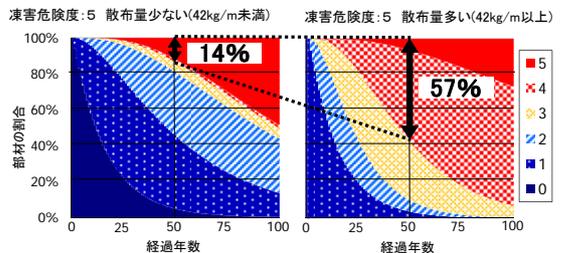


図-6 凍害危険度5における劣化度の推移の比較

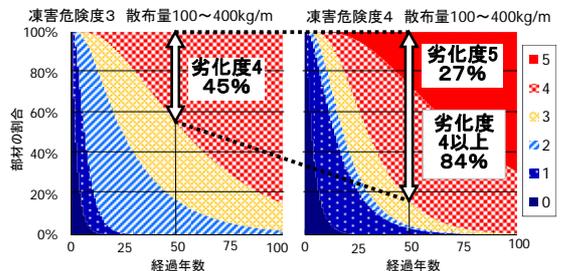


図-7 凍害危険度3と4における劣化度の推移の比較

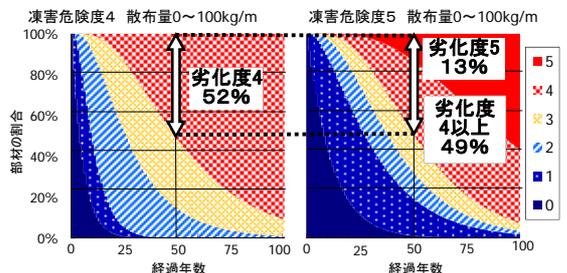


図-8 凍害危険度4と5における劣化度の推移の比較