

積雪寒冷地における発錆限界量の設計法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：令5～令7

担当チーム：耐寒材料チーム

研究担当者：島多昭典、三原慎弘、吉田行、
内藤勲、遠藤裕丈、長谷川諒

【要旨】

コンクリート標準示方書〔設計編〕に示されている、水セメント比と使用するセメントの種類から鉄筋腐食発生限界塩化物イオン量を定める設計式に関して、積雪寒冷地での適用性を検討した。コンクリートが凍害を受けると塩化物イオンの侵入が速まることを確認したが、鉄筋腐食発生限界塩化物イオン量は設計式と対応した。なお、鉄筋の腐食速度に関しては凍害の程度が大きいほど速く、耐久性設計で留意する必要があることもわかった。
キーワード：積雪寒冷地、鉄筋腐食発生限界塩化物イオン量、凍害、耐久性設計

1. はじめに

塩化物イオンの侵入に伴うコンクリート構造物の鉄筋腐食に対する照査について、現在は水セメント比とセメントの種類をもとに鉄筋腐食発生限界塩化物イオン量（以下、鉄筋腐食発生限界濃度と記す）を定めてよいこととなり、土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕には設計式も示されている。しかし、凍害など寒冷下での劣化条件は考慮されておらず、積雪寒冷地では凍害によって鉄筋付近の塩化物イオン量が予測より増える場合もあり、設計に苦慮する事例もある。

そこで積雪寒冷地での凍塩環境における塩害に対する補修設計法の構築を目的に、はじめに塩化物イオン侵入に及ぼす凍害の影響を調べた。次に塩化物イオンを与えた鉄筋コンクリートを凍害劣化させた後、乾湿繰返しを行い、鉄筋腐食面積率と塩化物イオン量の関係を調べた。

2. 実環境での塩化物イオン侵入に及ぼす凍害の影響

北海道の凍結防止剤散布路線を対象に、塩化物イオンの侵入に及ぼす凍害の影響を調べるため、道路橋で暴露実験を行った。また暴露実験を行った道路橋の塩化物イオン量についても調べた。

2.1 概要

表-1 に暴露実験用のコンクリート供試体の配合を示す。水セメント比は55%とした。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は表乾密度 2.72g/cm^3 、吸水率1.28%、粗粒率2.81、除塩処理済の苫小牧錦岡産海砂を用いた。粗骨材は表乾密度 2.68g/cm^3 、吸水率1.52%、粗粒率7.04、最大粒径25mm

表-1 暴露実験用のコンクリート供試体の配合

水セメント比(%)	単位量(kg/m ³)				実測スランプ(cm)	実測空気量(%)
	水	セメント	細骨材	粗骨材		
55	145	264	879	1067	9.2	4.6

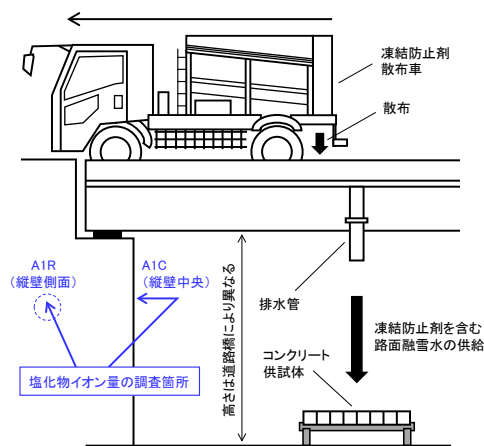


図-1 暴露実験および橋台調査の概況

の小樽見晴産砕石を用いた。スランプは $8\pm 2.5\text{cm}$ 、空気量は $4.5\pm 1.5\%$ を目標に、AE減水剤（リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体）とAE助剤（変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤）で調整した。供試体寸法は $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 400\text{mm}$ とした。打設後、湿布養生を7日間行った。その後は暴露開始まで温度 20°C 、湿度60%の恒温恒湿室に静置した。

暴露実験は図-1に示すように、道路橋の排水管直下の敷地に供試体を設置し、排水管から垂れ落ちる凍結防止剤を含む路面融雪水を供試体に与えた。路面融雪水を与える面は打設面とし、打設面以外の5面はエポキシ樹脂でコーティングした。図-2に暴露実験箇所を、

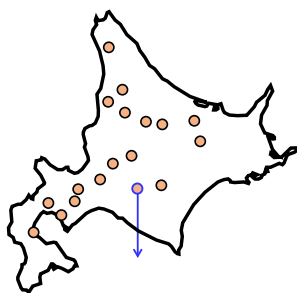


図-2 暴露実験箇所および橋台調査箇所



写真-1 暴露実験の様子



写真-2 塩化物イオン量調査を行った橋台の外観

写真-1 に暴露実験の様子を示す。ここでは過年度からの研究で暴露を開始して5年が経過した供試体を対象に、塩化物イオン量とスケーリング深さを測定した。塩化物イオン量は JIS A 1154 の電位差滴定法に準じて測定した。スケーリング深さは暴露開始前の剥離していない箇所を基準面とし、スケーリング発生箇所に先端の尖ったφ4mm のステンレス棒をあて、基準面からの棒の移動量から求めた。スケーリング深さの測定は1 供試体につき 63 点行い、その平均を測定値とした。

また、暴露実験を行った 18 橋の道路橋のうち、年間の凍結防止剤散布車出動回数が最も多い日高管内の 1 橋(図-2)において、橋台の塩化物イオン量を調べた。この橋は建設から約 40 年が経過している。調査は図-1 に示すように橋台の 2 箇所(A1C、A1R)で行った。A1C、A1R のコンクリート表面は、写真-2 に示すように、いずれも粗骨材が部分的に露出する程度のスケーリングが発生している。

2.2 結果・考察

北海道の一般国道では全線散布ではなく、橋上など滑りやすい箇所へ集中的に散布することが多い。そこで1 回あたりの散布量は箇所によらず同程度と考え、凍結防止剤散布車の出動回数で塩分環境を表すこととした。出動回数は往復散布1 回を出動1 回とした。

図-3 は塩化物イオン量の測定結果を散布車出動回数ごとに一括整理したものである。図には暴露実験の供試体を対象に、式(1)¹⁾に示すコンクリート標準示方書の設計式(普通ポルトランドセメント使用)から求

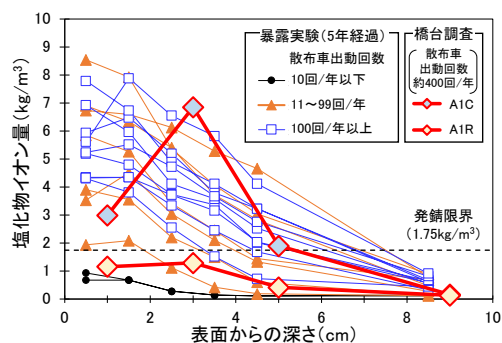


図-3 塩化物イオン濃度分布

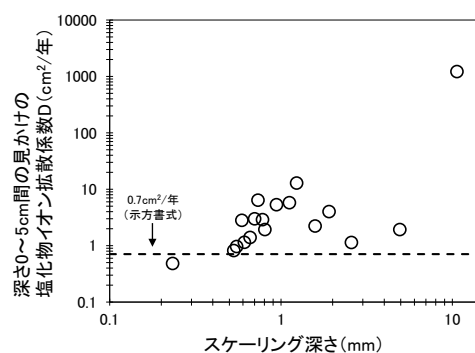


図-4 スケーリング深さと深さ 0～5cm 間の塩化物イオン拡散係数との関係(暴露 5 年経過)

まる鉄筋腐食発生限界濃度 1.75kg/m^3 も破線で示した。

$$C_{\text{lim}} = -3.0(W/C) + 3.4 \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad (1)$$

ここに、 C_{lim} は鉄筋腐食発生限界濃度(kg/m^3)、 W/C は水セメント比である。

暴露供試体に関しては、出動回数 11 回/年以上の地域では全体的に深さ 0～5cm 間の塩化物イオン量が 1.75kg/m^3 を上回る結果となった。橋台では、桁下 A1C の深さ 3cm で 7kg/m^3 の塩化物イオンが確認された。また暴露供試体とは異なり、内部への移動濃縮が疑われる分布が確認された。一方で外側の A1R は 1.75kg/m^3 を下回り、部位によって傾向が異なることもわかった。

ここで、暴露供試体の 0～5cm の塩化物イオン濃度分布に対して、式(2)²⁾に示す Fick の拡散方程式の解で回帰し、深さ 0～5cm 間の拡散係数を求めた。

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

ここに、 $C(x, t)$ は t 年後の深さ x cm の塩化物イオン量(kg/m^3)、 C_0 は表面塩化物イオン量(kg/m^3)、 x は深さ (cm)、 D は塩化物イオン拡散係数($\text{cm}^2/\text{年}$)、 t は経過年数(年)である。

図-4 に 5 年経過後の暴露供試体のスケーリング深さ

と、全体のうち凍害の影響を受けやすい深さ 0～5cm 間の塩化物イオン拡散係数との関係を示す。普通ポルトランドセメントを使用する場合の塩化物イオン拡散係数の設定に関して示方書¹⁾には式(3)が示されている。

$$\log_{10} D = 3.0(W/C) - 1.8 \quad (0.30 \leq W/C \leq 0.55) \quad (3)$$

W/C を 0.55 とすると、 D は $0.7\text{cm}^2/\text{年}$ となる。スケーリングが小さい供試体の D は $0.7\text{cm}^2/\text{年}$ に近い値を示した。一方、スケーリング深さが 1mm 前後の供試体は D が 1～10 倍増加し、スケーリング深さが 10mm の供試体は D が 1000 倍と大幅に増加する傾向が示された。

このことから、コンクリートが凍害を受けると、塩化物イオンの侵入が速まることがわかった。なお、実構造物においては内部への移動濃縮も相まって、塩化物イオンの侵入はさらに速まると考えられる。

3. 低温環境における発錆限界量の検討

次に、コンクリート標準示方書に示されている鉄筋腐食発生限界濃度の設計式に関して、寒冷地での適用性を検討するため、塩化物イオンを与えた鉄筋コンクリート供試体を凍害劣化させ、その後、乾湿繰返し試験を行い、鉄筋腐食面積率と塩化物イオン量の関係について調べた。

3.1 概要

表-2 にコンクリートの配合を示す。水セメント比は 55% とした。セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は、表乾密度 $2.71\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 0.77% の除塩処理済の苦小牧錦岡産海砂を用いた。粗骨材は表乾密度 $2.66\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 1.65%、最大寸法 20mm の小樽見晴産碎石を用いた。鉄筋腐食発生限界濃度を検討するため、コンクリートに塩化物イオンを混入させることとし、混入量 (kg/m^3) は、0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.75、2.0、2.5 の 12 水準とした。ここでは凍害を促進させるため、non-AE とした。図-5 に供試体を示す。寸法は $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 60\text{mm}$ とした。供試体には D13 鉄筋を埋設した。かぶりは 30mm とした。打設後、湿布養生を 7 日間行った。その後は試験開始まで温度 20°C 、湿度 60% の恒温恒湿室に静置した。また、後述する乾湿繰返し試験を行う前に、乾湿作用を主に一面から受ける実際のコンクリート部材を模して、打設面以外の 5 面をエポキシ樹脂でコーティングした。

図-6 に実験の流れを示す。コンクリートの状態は、凍害小、凍害中、凍害大の 3 水準とした。はじめに、あらかじめ凍害劣化させるため、JIS A 1148 に準じた

表-2 コンクリート供試体の配合

水セメント比(%)	単位量(kg/m^3)				実測スランプ(cm)	実測空気量(%)
	水	セメント	細骨材	粗骨材		
55	163	296	882	1059	11.2	2.1

■塩化物イオン混入量 (kg/m^3)
0.0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4、1.6、1.75、2.0、2.5 (12 水準)

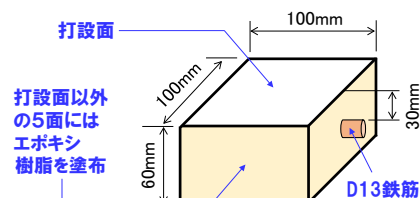


図-5 供試体

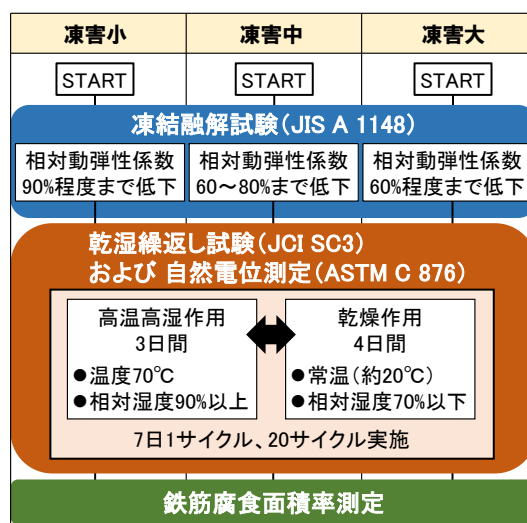


図-6 実験の流れ

表-3 自然電位の評価基準

自然電位 E (mV)	鉄筋腐食の可能性
$-200 < E$	90%以上の確率で腐食なし
$-350 < E \leq -200$	不確定
$E \leq -350$	90%以上の確率で腐食あり

凍結融解試験を行った。凍害の程度は、凍害小が相対動弾性係数 90%程度、凍害中は 60～80%、凍害大は 60%程度とし、所定の状態に達するまで試験を続けた。次に、すべての供試体を対象に乾湿繰返し試験を行った。試験は JCI SC3 を参考に、温度 70°C で相対湿度 90%以上の高温高湿作用を 3 日間、常温で相対湿度 70%以下の乾燥作用を 4 日間の 7 日 1 サイクルの乾湿繰返しを 20 サイクル行った。また、鉄筋腐食の推移を調べるため ASTM C 876 に準じ、飽和硫酸銅電極を用いた自然電位の測定を行った (表-3)。20 サイクル後に鉄筋を取り出し、鉄筋表面の腐食範囲の面積を測定し、鉄筋腐食面積率 (鉄筋表面における腐食範囲の面積/鉄筋

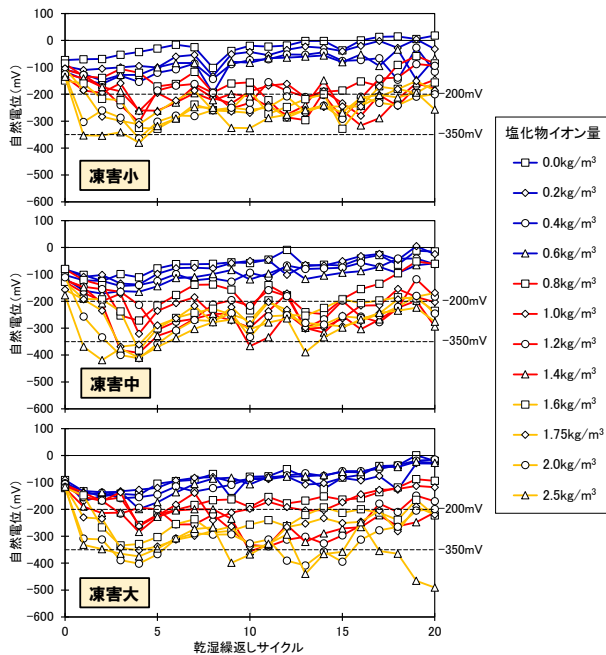


図-7 乾湿繰返し試験における自然電位の推移

表面全体の面積)を調べた。

3.2 結果・考察

図-7 に乾湿繰返し試験における自然電位の推移を示す。凍害小・中・大のいずれにおいても、塩化物イオン量が 1.6kg/m^3 以上の供試体は試験開始直後から自然電位が急速に低下した。これは、塩化物イオン濃度が高い領域では、アノード反応が急速に進行したためと考えられる。このうち、凍害大の塩化物イオン量 2.5kg/m^3 の供試体に関しては 18 サイクル以降、自然電位が -350mV 以下に至り、凍害の影響が示唆された。

図-8 に塩化物イオン量と乾湿繰返し試験後の鉄筋腐食面積率の関係、写真-3 は乾湿繰返し試験後における塩化物イオン量 2.5kg/m^3 の供試体の鉄筋の外観を示している。コンクリート標準示方書の設計式による鉄筋腐食発生限界濃度は、式(1)より 1.75kg/m^3 である。鉄筋腐食面積率は、塩化物イオン量が 1.75kg/m^3 を超えると増加が顕著となり、かつ、凍害小<中<大の関係が示され、鉄筋腐食面積率に及ぼす凍害の影響も確認された。

このことから、普通ポルトランドセメントを使用した実験の範囲ではあるが、鉄筋腐食発生限界濃度に関しては、寒冷地においても式(1)で示したコンクリート標準示方書の設計式から定めることは可能と考えられる。一方で、鉄筋の腐食速度に関しては、コンクリートの凍害の程度が大きいほど速くなることが明らかとなり、耐久性設計において留意する必要があることもわかった。

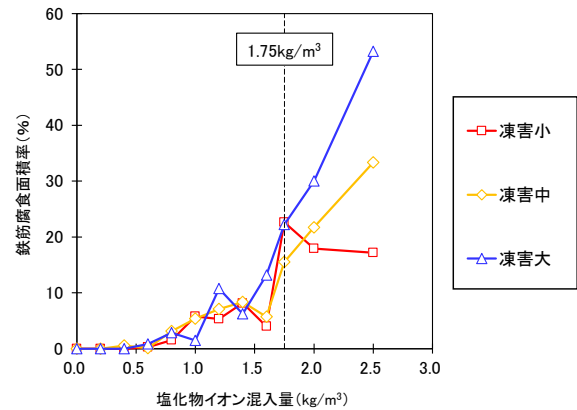


図-8 塩化物イオン量と乾湿繰返し試験後の鉄筋腐食面積率の関係

凍害の程度	Cl ⁻ 量	鉄筋状態（乾湿繰返し20サイクル後）
凍害小	2.5kg/m ³	
凍害中		
凍害大		

写真-3 乾湿繰返し試験後における塩化物イオン量 2.5kg/m^3 の供試体の鉄筋の状態

4. まとめ

寒冷地における塩害に対する補修設計法の構築を目的とし、はじめに、実環境において、塩化物イオンの侵入に及ぼす凍害の影響について調べた。次に、コンクリート標準示方書〔設計編〕に示されている水セメント比と使用するセメントの種類から鉄筋腐食発生限界塩化物イオン量を定める設計式に関して、寒冷地での適用性を検討した。得られた知見を整理すると、以下になる。

- 1) コンクリートが凍害を受けると、塩化物イオンの侵入が速まる。深さ $0\sim 5\text{cm}$ における塩化物イオン拡散係数は、スケーリング深さが 1mm 前後になると $1\sim 10$ 倍、 10mm になると 1000 倍増加した。
- 2) 構造物では、内部への移動濃縮も相まって、塩化物イオンの侵入はさらに速まると考えられる。
- 3) 寒冷地においても、鉄筋腐食発生限界濃度に関しては、コンクリート標準示方書の設計式から定めることは可能と考えられる。
- 4) 鉄筋の腐食速度は、凍害の程度が大きいほど速く、耐久性設計において留意する必要がある。

参考文献

- 1) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，pp.156-162，2018.3
- 2) 小林一輔ほか：鉄筋腐食の診断，p.174，森北出版，1993.5

STUDY ON DESIGN METHOD FOR CHLORIDE THRESHOLD VALUES FOR CORROSION OF STEEL BARS IN SNOWY AND COLD REGIONS

Research Period: FY2023-2025

Research Team: Materials Research Team, Cold-Region
Maintenance Engineering Research Group

Author: SHIMATA Akinori

MIHARA Norihiro

YOSHIDA Susumu

NAITO Isao

ENDOH Hirotake

HASEGAWA Ryo

Abstract: The applicability of the design formula for determining the chloride threshold values for corrosion of steel bars, based on the water-cement ratio and type of cement used, as shown in the Japan Society of Civil Engineers Standard Specifications for Concrete Structures [Design], in snowy and cold regions was examined. It was confirmed that chloride ion penetration accelerates when concrete is subjected to frost damage. However, the chloride threshold values for corrosion of steel bars corresponds to the design formula. It was also found that the greater the degree of frost damage, the faster the corrosion rate of steel, and this needs to be taken into consideration when designing durability.

Keywords: Snowy and cold regions, Chloride threshold values for corrosion of steel bars, Frost damage, Durable design

論文リスト

- 学術誌等による成果普及

査読無し論文・国内（計 2 本）

- c-1) 遠藤裕文、島多昭典：凍結防止剤散布地域での 5 年間の暴露実験に基づくコンクリートへの塩化物イオン浸透評価、土木学会第 78 回年次学術講演概要集（V 部門）、V-672、2023.9
- c-2) 遠藤裕文、三原慎弘：寒冷地における鉄筋コンクリートの腐食発生限界塩化物イオン量の設計に関する基礎的研究、土木学会第 80 回年次学術講演概要集（V 部門）、V-39、2025.9