

報告

凍結防止剤散布地域の床版における 表面塩化物イオン濃度と塩害耐久性評価

辻角学*, 稲葉尚文**, 本庄正樹***, 空閑健作***

* 工博, 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株), 金沢支店道路技術部土木管理課 (〒920-0395 金沢市神野町東 202)

** 工博, 中日本高速道路(株), 金沢支社保全・サービス事業部構造技術チーム (〒920-0365 金沢市神野町東 170)

*** 中日本高速道路(株), 金沢支社保全・サービス事業部構造技術チーム (〒920-0365 金沢市神野町東 170)

塩害による床版の損傷は、凍結防止剤の散布される地域においても多くの事例が報告されているが、そのような凍結防止剤散布下の床版における塩分量調査結果の報告は少なく、表面塩化物イオン濃度の設定方法は設計照査上の大きな課題となっている。本稿では、比較的多量の凍結防止剤が散布される北陸自動車道の床版を対象として、塩分量調査を実施しその結果から表面塩化物イオン濃度の設計値を設定するとともに、設計供用期間 100 年間にわたり床版の機能が保持されるための標準的な仕様決定を行った結果を報告するものである。

キーワード：凍結防止剤, 表面塩化物イオン濃度, 塩害耐久性, エポキシ樹脂塗装鉄筋

1. はじめに

北陸地方はわが国の代表的な積雪寒冷地であり、冬期の主要幹線道路では主に凍結防止剤（塩化ナトリウム）の散布によって交通の安全が確保されている。

近年、凍結防止剤を原因とする橋梁床版の塩害劣化が深刻化し、多くの損傷が報告されている¹⁾が、塩化ナトリウム剤散布に替わる方法、例えばロードヒーティングや代替剤散布といった方法には、経済性（耐久性）や環境安全性などいくつかの課題があり、汎用には至っていない。

すなわち、最も一般的な路面凍結の防止方法である塩化ナトリウム剤散布によって、現在も床版の上面では塩化物イオンが蓄積され続けているにもかかわらず、このような凍結防止剤散布下における床版の塩分量調査の報告事例は極めて少ないのが実情である。

後述するように、塩害に対する耐久性評価式はセメント種別、水セメント比、かぶり、表面塩化物イオン濃度などいくつかのパラメータによって成り立っているが、表面塩化物イオン濃度については既往の調査結果が十分でないことから、例えば凍結防止剤散布量と表面塩化物イオン濃度を関連付けるなど、表面塩化物イオン量を概算することが難しく²⁾、基本的には実際に床版上縁の塩

分量調査を行って表面塩化物イオン濃度を設定する必要があり、設計を進めるうえで大きな負担となっている。

例えば、これまでの調査結果などから、表面塩化物イオン濃度の設計値を統計的处理によって設定することができれば、設計実務上の負担は解決される。北陸地方において床版の塩分量調査を行うことは、凍結防止剤散布地域における表面塩化物イオン濃度の設定において、重要な知見になると考えられた。

本検討は、2015 年度から開始された高速道路リニューアル事業において、凍結防止剤が散布される北陸自動車道の床版取替工事を実施する過程で、床版の塩分量調査を実施し、表面塩化物イオン濃度の設計値を設定するとともに、設計供用期間 100 年間にわたり床版の機能が保持されるための標準的な仕様決定を行った結果を報告するものである。

2. 塩害による床版耐久性の評価方法

NEXCO 中日本における取替床版（プレキャスト PC 床版）の標準的な配筋例を図-1 に示す。床版の継手が RC ループ継手（曲げ加工が必要）であること、および床版取替の対象となるような従来桁構造では床版支間方向の応力照査に余裕があることから、軸方向鉄筋を外側（か

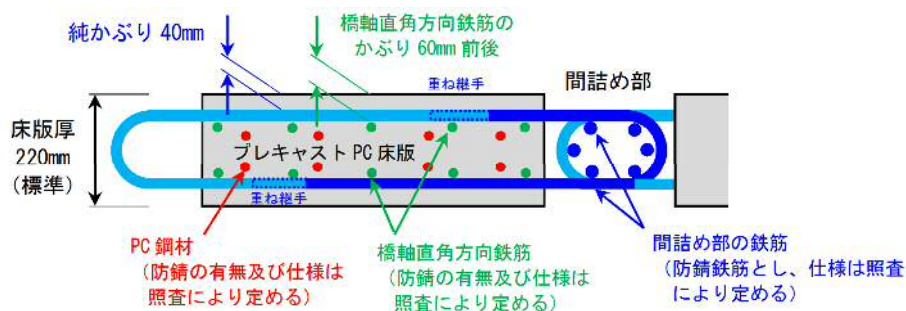


図-1 プレキャスト PC 床版の標準的な配筋例

表-1 表面塩化物イオン濃度

IC間	調査箇所数	表面塩化物イオン濃度(kg/m ³)			【参考】 H1～H22 凍結防止剤 累積散布量(t/km)
		平均 μ	標準偏差 σ	特性値 $\mu + 3\sigma$	
敦賀IC～今庄IC	24	0.495	0.103	0.803	1750
今庄IC～武生IC	33	1.010	0.441	2.332	849
鯖江IC～福井IC	78	0.600	0.468	2.005	873
富山IC～立山IC	96	0.781	0.567	2.480	1150
魚津IC～黒部IC	96	0.978	1.209	4.605	1042
全区間	327	0.798	0.791	3.172	1138

ぶり鉄筋)に配置している。

外縁鉄筋、継手部鉄筋を防錆鉄筋としているが、鉄筋の防錆仕様は基本的に 100 年の耐久性が満足されるかを照査した結果に基づいて決定される。

式(1)、(2)に表面塩化物イオン濃度に対する床版の耐久性照査式^{3),4)}を示す。

$$\gamma_i \cdot C_d / C_{lim} \leq 1.0 \quad (1)$$

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1}{2\sqrt{t}} \left(\frac{c_d}{\sqrt{D_d}} + \frac{c_{ep}}{\sqrt{D_{epd}}} \right) \right) \right) + C_i \quad (2)$$

ここに、 γ_i : 構造物係数
 C_d : 鋼材位置における塩化物イオン濃度 (kg/m³)
 C_{lim} : 鋼材腐食発生限界濃度 (kg/m³)
 γ_{cl} : C_d のばらつきを考慮した安全係数
 C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³)
 t : 塩化物イオンの侵入に対する耐用年数 (年)
 c_d : かぶりの設計値 (mm)



写真-1 コア採取状況

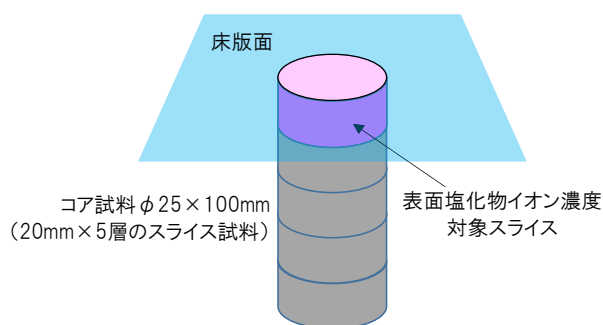


図-2 コア採取とスライス試料

表ー2 耐久性照査結果（耐久性 100 年を満足する仕様の決定）

CASE	セメント種別	配力筋	主鉄筋	PC鋼材	耐久性100年を満足する 表面塩化物イオン濃度 $C_0(\text{kg}/\text{m}^3)$ の限界値
1	早強セメント	エポキシ樹脂 塗装鉄筋	普通鉄筋	普通PC鋼材	$C_0 \leq 2.96$
2	早強セメント	エポキシ樹脂 塗装鉄筋	エポキシ樹脂 塗装鉄筋	普通PC鋼材	$C_0 \leq 3.18$
3	高炉セメントB種相当 (フライアッシュセメントB種相当)	エポキシ樹脂 塗装鉄筋	普通鉄筋	普通PC鋼材	$C_0 \leq 12.29(4.02)$
4	高炉セメントB種相当 (フライアッシュセメントB種相当)	エポキシ樹脂 塗装鉄筋	エポキシ樹脂 塗装鉄筋	普通PC鋼材	$C_0 \leq 14.57(4.34)$

D_d : 塩化物イオンに対する設計拡散係数
($\text{cm}^2/\text{年}$)

c_{ep} : エポキシ樹脂塗装の厚さ (mm)

D_{epd} : エポキシ樹脂塗装厚における塩化物
イオンに対する設計拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

C_i : 初期塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

式(1),(2)を用いて耐久性 100 年に対する照査を行うことにより、鉄筋、PC 鋼材の防錆の有無、コンクリート種別などの仕様決定される。

式中、表面塩化物イオン濃度 C_0 が結果に与える影響は大きい。耐久性照査のためにこの数値の設定が重要であることは前記した通りである。

3. 表面塩化物イオン濃度の設定

北陸自動車道各区分における橋梁床版の塩分量調査結果を表ー1に示す。調査は防水層が設置されていない橋梁を対象とし、路面より $\phi 25\text{mm}$ のコアを採取（写真ー1参照）し行った。1本のコア試料より深さ方向に20mmごと5つのスライス試料を作成し、最上縁の結果をもって表面塩化物イオン濃度とした（図ー2参照）。

表面塩化物イオン濃度の設定には、上記5スライスの塩分濃度分布から、フィックの拡散方程式を準用して最小二乗法により推定する方法⁵⁾もあるが、5スライスの分布が理想的な拡散状態を示していることが稀であったため、本検討では採用しなかった。

全区間で得られた合計327のデータに対し、調査区分によるばらつきが大きいこと、また凍結防止剤散布量との明らかな相関が認められないことから、表面塩化物イオン濃度は全区間の平均値+3×標準偏差により設定し、 $3.172\text{kg}/\text{m}^3$ とした。この値を超過したデータは全体の3%程度である。

表ー3 検討条件

水セメント比	34.7 %
防水層の 遮塩効果	考えない (マルチレイヤプロテクションによる対策として扱う)
橋軸方向鉄筋の かぶり	40mm
橋軸直角方向鉄筋の かぶり	59mm
PC 鋼材の かぶり	62mm
エポキシ樹脂塗装 膜厚	鉄筋: $220\mu\text{m}$ PC 鋼材: $200\mu\text{m}$

なお、同時に実施した調査より、床版上面からの中性化はほとんど進行していない（0～2mm 程度）ことを確認している。

4. 耐久性照査結果と仕様の決定

式(1),(2)により耐久性評価（耐久性 100 年を確保できる表面塩化物イオン濃度の限界値算出）を行った結果を表ー2に示す。式中のパラメータは基本的に参考文献 3),4)に基づき算出しているが、水セメント比は PC メーカー 10 社の工場における過去 5 年間の実績平均から 34.7%とした。また、防水層については、マルチレイヤプロテクションによる対策として考え、塩化物イオンの遮断効果を考えずに塩害耐久性評価を行うこととした。以上を含め、検討条件を表ー3に示す。

表ー2より、CASE2～CASE4で表面塩化物イオン濃度

3.172kg/m³における耐久性100年を満足していることが解る。すなわち、混合セメントを用いない場合にはCASE2(主鉄筋:エポキシ樹脂塗装),混合セメントを用いる場合にはCASE3(主鉄筋:普通鉄筋)が選択肢となる。

過去にNEXCOで実施されたPC床版の輪荷重載荷試験では、通常の荷重において押し抜きせん断破壊には至っていないものの、ひび割れの発生が確認されている。また、床版取替の対象となる既設橋では、斜橋が多いこと、および鋼桁の補強を避けるために合成桁設計が採用される事例が多いことから、床版への負担、ひび割れ発生リスクが大きい状況にある。

よってCASE2, CASE3の選択においては、ひび割れによる急激な塩分浸透に配慮して鉄筋は防錆することが望ましく、本検討で設計された表面塩化物イオン濃度 3.172kg/m³においては、CASE2の仕様(早強セメント, 配力筋・主鉄筋:エポキシ樹脂塗装, PC鋼材:防錆仕様なし)とすべきであると考えた。

5. 仕様決定の流れ

図-3に仕様決定までの流れを示す。表面塩化物イオン濃度については、さらにデータの拡充に努め、検討時点で数値を見直す必要がある。

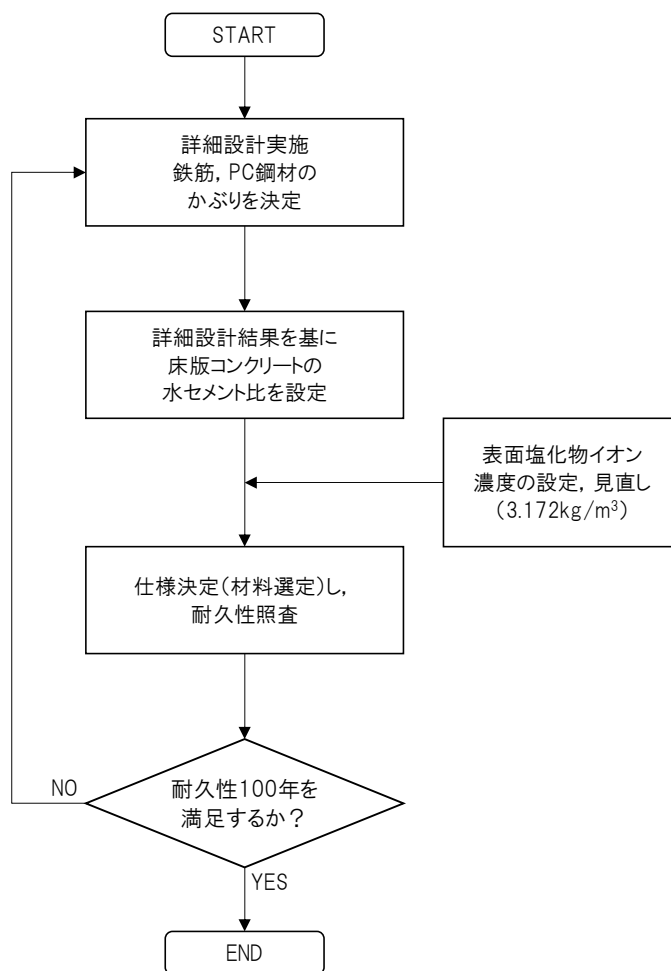


図-3 仕様決定フロー

6. まとめ

- 北陸自動車道における床版上面の塩分量調査を実施し、327地点でコア採取を行った。
- コアの上縁スライス(20mm)の塩分量をもって表面塩化物イオン濃度とし、その設計値は、《調査全区間の平均値+3×標準偏差》によって設定することとした。
- 上記により設定された表面塩化物イオン濃度3.172kg/m³において、早強セメントを採用した場合でも、配力筋、主鉄筋をエポキシ樹脂塗装仕様とすることで、100年の耐久性が満足されることを確認した。
- 照査結果および取替床版のひび割れリスクに配慮して、鉄筋は防錆することが好ましいと考えられた。
- 塩分量調査については今後もデータの拡充を図り、表面塩化物イオン濃度の設計値を適正に見直ししていく必要がある。

参考文献

- 1) 例えば、本荘清司, 横山和昭, 藤原規雄:凍結防止剤による鋼橋RC床版の塩害劣化に関する実橋調査, コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集8巻, 2008.10
- 2) 桑原, 梅村, 酒井:高速道路橋における床版の塩化物イオン浸透予測に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, 2010
- 3) 土木学会:2012年制定コンクリート標準示方書 設計編, 2013.3
- 4) 土木学会:エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針, コンクリートライブラリー112, 2003.11
- 5) (独)土木研究所:コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シート使用マニュアル, 2003.8

(2018年7月20日受付)