

更新床版の凍結防止剤による 塩害に対する照査方法

若林 大*

老朽化により床版取替えに至る既設 RC 床版の劣化要因の一つは凍結防止剤散布に伴う塩害であり、取替えにより新規で設置する床版（以下、「更新床版」という）では、こうした環境作用に対する耐久性確保が重要となる。塩害に伴う鋼材腐食に対する耐久性の照査方法は、（公社）土木学会などの規準類に示されているが、凍結防止剤散布に伴う床版への環境作用の設定方法については具体的な指標がなく、設計での適用が難しい状況であった。そこで、凍結防止剤散布量が多い区間の既設橋において実施した約 1 200 箇所の塩分量調査データを整理したところ、凍結防止剤散布量、縦横断線形、調査位置の違いなどによる塩分量の差異の傾向は確認できず、ばらつきも非常に多い状況であった。このため、安全側の配慮から同データより算出した「平均値 + 3 × 標準偏差」となる値より、更新床版の耐久性照査に用いる表面塩化物イオン濃度の標準値を 5.0 kg/m³ と設定した。また、更新床版を対象として表面塩化物イオン濃度の違いによる耐久性への影響について試算し、耐久性照査の結果から材料の組合せを選定できることを示した。加えて、凍結防止剤散布の影響を直接受ける壁高欄に対しては、凍結防止剤散布量から表面塩化物イオン濃度を設定し、耐久性照査を行う手法を示した。

キーワード：凍結防止剤、塩害、耐久性照査、床版、壁高欄、表面塩化物イオン濃度

1. はじめに

中日本高速道路(株)（以下、「NEXCO 中日本」という）が施工を進めている床版取替え（写真 - 1）の対象の多くは老朽化が著しい RC 床版であるが、その主たる劣化要因の 1 つが凍結防止剤散布に伴う塩害である。このため、更新床版の設計では、既設床版で劣化要因となった環境作用に対する耐久性の確保が重要となる。

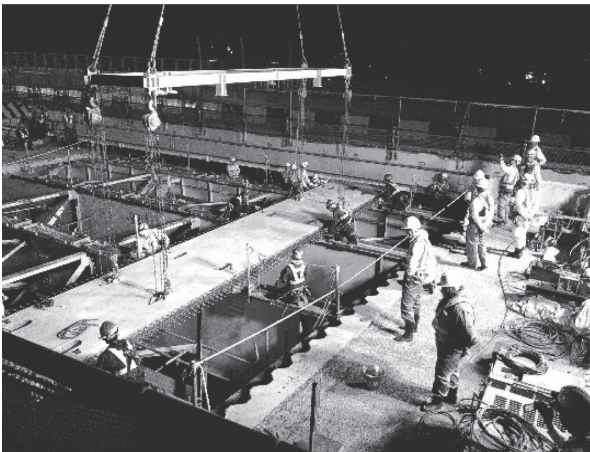


写真 - 1 床版取替えの工事の施工状況

NEXCO 設計要領¹⁾では、短期間で施工可能なプレキャスト PC 床版を更新床版の標準形式としており、水の浸入や塩害に対する耐久性確保のための対策として、次の内容を規定している。

1) プレキャスト部材の接合部や打継部に配置する鉄筋

は、エポキシ樹脂塗装鉄筋を標準とする。

2) 接合部の場所打ちコンクリートには、膨張材を使用する。

3) 高性能床版防水の施工を標準とする。

これらの対策を実施することで一定の耐久性を確保できるものと考えられるが、環境条件に応じた耐久性の定量的な評価方法については、検討途上である。

塩害に対する耐久性を向上させるための方策としては、防錆鉄筋の使用範囲拡大、ステンレス鉄筋や防錆 PC 鋼材など高耐久な材料の採用、高炉スラグ微粉末などの混和材の利用などがあげられる。凍結防止剤散布に伴う塩害を繰り返さないためには、このような耐久性の高い材料を適切に活用し、現地条件により異なる環境作用の差を適切に反映しつつ耐久性を照査することが必要である。

こうした課題を解決するため、NEXCO 中日本が管理する既設橋の調査結果に基づき、凍結防止剤散布に伴う塩害に対する耐久性照査方法を取りまとめたので、本稿ではその結果について報告する。

2. 更新床版の耐久性照査

2.1 床版の耐久性照査における基本条件と手順

凍結防止剤散布に伴う塩害に対する耐久性照査の基本条件は、次のとおりとした。

1) 耐久性照査は、照査期間 100 年において、塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度に達しないことを確認することにより行う。

2) 床版上面の表面塩化物イオン濃度の設定にあたっては、「更新用プレキャスト PC 床版技術指針²⁾」に準拠し、床版防水層による塩化物イオンの遮塩効果を

* Dai WAKABAYASHI：中日本高速道路(株) 技術・建設本部 環境・技術企画部 構造技術チーム

考慮しないマルチレイヤープロテクションの考え方を採用する。

- 3) 凍結防止剤散布に伴う環境作用は、当該橋梁の区間における塩分量調査データに基づくことを基本とするが、雪氷区間*においては、NEXCO 中日本管内における約 1200 箇所の調査データより定めた標準値を用いることもできる。

*本稿では、上下線別に集計した年間（1シーズン）あたりの凍結防止剤散布量が、10 t/km 以上となる区間を目安とした。

以上の条件で耐久性照査を実施し、耐久性 100 年を満足するように材料選定を行う。照査の手順を図 - 1 に示す。

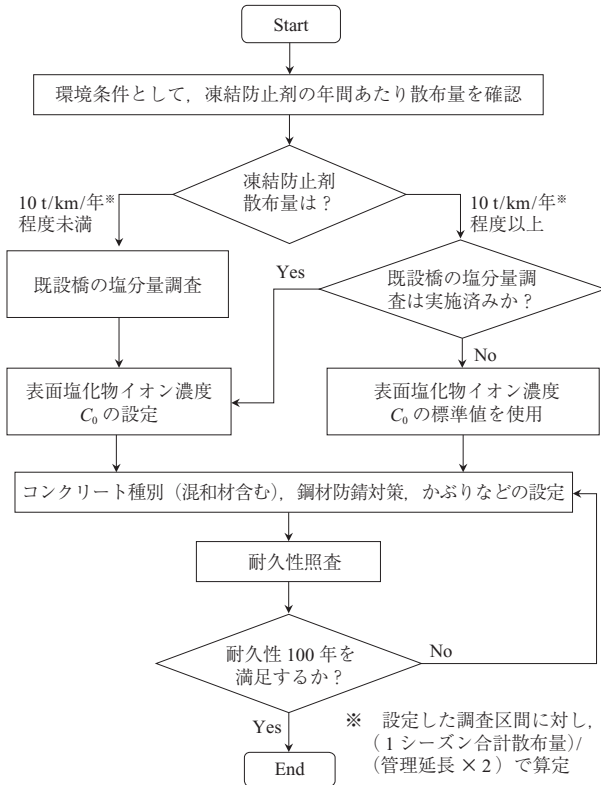


図 - 1 塩害に対する耐久性照査の流れ

2.2 床版の耐久性照査方法と課題

塩害に伴う鋼材腐食に対する耐久性照査の手法は、コンクリート標準示方書（土木学会）など^{2,3)}で規定されており、式(1)により照査できる。

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

γ_i : 構造物係数 (= 1.1), C_{lim} : 鋼材腐食発生限界濃度 (kg/m³), 本項では文献 2), 3) に準拠し, $C_{lim} = -3.0 (W/C) + 3.4$ (普通ポルトランドセメント), $C_{lim} = -2.2 (W/C) + 2.6$ (早強ポルトランドセメント), $C_{lim} = -2.6 (W/C) + 3.1$ (高炉セメント B 種相当) を使用, W/C : コンクリートの水セメント比, C_d : 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 (kg/m³) で式(2)および(3)

鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d は、普通鉄筋およびステンレス鉄筋を用いる場合は式(2)、エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる場合は式(3)で算出できる。本

稿では、各安全係数は原則として文献 2) ~ 4) に示される安全側の値を採用し、設計用値は標準的な値としている。

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

$$C_d = \gamma_{ct} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1}{2\sqrt{t}} \left(\frac{c_d}{\sqrt{D_d}} + \frac{c_{ep}}{\sqrt{D_{epd}}} \right) \right) \right) + C_i \quad (3)$$

γ_{ct} : C_d のばらつきを考慮した安全係数 (= 1.3), C_0 : コンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m³), c_d : 耐久性照査に用いるかぶりの設計値 (mm), D_d : 塩化物イオンに対する設計拡散係数 (cm²/年) で式(4), c_{ep} : エポキシ樹脂塗装の厚さの期待値 (= 220 μm), D_{epd} : エポキシ樹脂塗装内への塩化物イオンの侵入を拡散現象とみなした場合の塩化物イオンに対する見掛けの拡散係数の設計用値 (= 2.0 × 10⁻⁶ cm²/年), t : 塩化物イオンの侵入に対する耐用年数 (= 100 年), C_i : 初期塩化物イオン濃度 (= 0.30 kg/m³), $\operatorname{erf}(s)$: 誤差関数であり $\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta$ で表される。

次いで、塩化物イオンに対する設計拡散係数 D_d は、式(4)で算出できる。

$$D_d = \gamma_c \cdot D_k + \lambda \cdot (w/l) \cdot D_0 \quad (4)$$

γ_c : コンクリートの材料係数 (床版上面が対象のため = 1.3), D_k : コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 (cm²/年), 本項では文献 2) に準拠し, $\log_{10} D_k = 3.0 (W/C) - 1.8$ (普通ポルトランドセメント), $D_k = 15.768 e^{-1.6 (W/C)}$ (早強ポルトランドセメント), $\log_{10} D_k = 3.2 (W/C) - 2.4$ (高炉セメント B 種相当) を使用, λ : ひび割れの存在が拡散係数に及ぼす影響を表す係数 (= 1.5), D_0 : コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼすひび割れの影響を表す係数 (= 400 cm²/年), w/l : ひび割れ幅とひび割れ間隔との比 (本稿では設計計算例より、ひび割れを考慮する場合、 $w/l = (\sigma_{se}/E_s) + \varepsilon_{csd} = 0.00055$ を使用), σ_{se} : 鋼材位置のコンクリートの応力度が 0 の状態からの鉄筋応力度の増加量 (N/mm²), ε_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープなどによるひび割れ幅の増加を考慮するための数値

式(1)~(4)により、エポキシ樹脂塗装鉄筋、ステンレス鉄筋および高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートなど、さまざまな材料の組合せに対して耐久性照査を行うことが可能であり、各安全係数や設計用値は文献 2)~4) を参照して設定できるが、床版コンクリート上面（表面）における塩化物イオン濃度 C_0 の設定方法に関する指標がないため、設計での適用が難しいことが課題であった。

2.3 床版コンクリート上面における表面塩化物イオン濃度の設定方法

既設橋では、既設床版上面の塩分量データを取得できるため、実状に近い条件でコンクリート表面の塩化物イオン濃度を設定することが可能である。このことから、照査に用いる表面塩化物イオン濃度 C_0 の設計値は、床版取替えの対象橋梁において凍結防止剤散布による環境作用の影響を適切に評価できる十分な量の調査データに基づいて設定

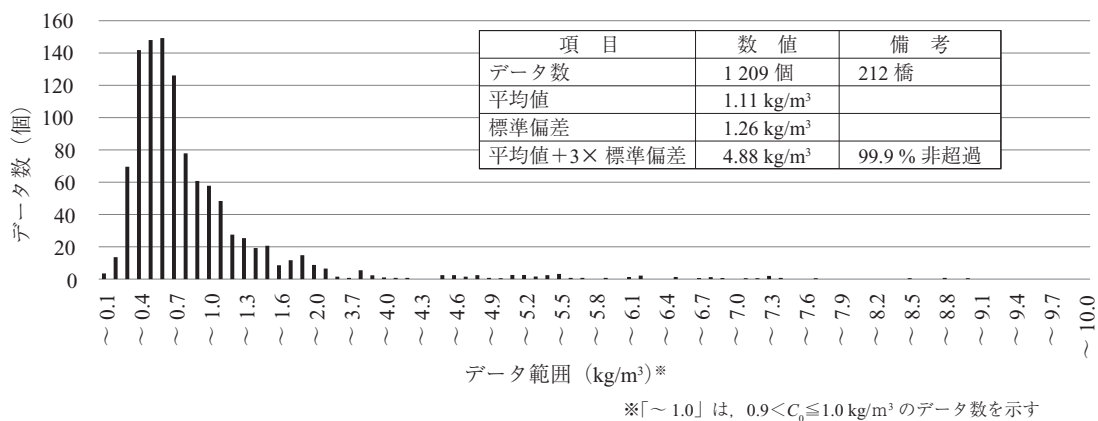


図 - 2 床版上面（表面）の全塩化物イオン量調査結果

することを基本とした。

一方、これまでに実施した塩分量調査結果に基づき、雪氷区間において設計で使用するための表面塩化物イオン濃度 C_0 の標準値についても別途定めることとした。

図 - 2 は、平成 27～28 年度に実施した塩分量調査データに基づき、床版上面（表面）の全塩化物イオン量の頻度分布について整理した結果である。この調査データは、NEXCO 中日本が管理する中央自動車道、北陸自動車道、名神高速道路などの雪氷区間において実施されたものであり、調査データの条件は、次のとおりである。

- 1) 平成 27 年度の冬季における凍結防止剤散布量は、11.6～23.1 t/km/年である。
- 2) 調査箇所の路線は、昭和 39 年～昭和 58 年に供用開始した区間である。
- 3) 本調査は床版更新の計画立案を目的として実施されたものであり、調査箇所の詳細位置は指定していないが、横断勾配が低い側の路肩や車線が比較的多い。
- 4) 調査データ数は、212 橋、1 209 箇所であり、1 橋あたりの調査箇所数は、3～8 箇所である。
- 5) 大多数の調査箇所で床版防水は実施していない。
- 6) 床版面は舗装下にあるため、中性化の影響で表面塩化物イオン濃度が低下する現象は見られない。
- 7) 表面塩化物イオン濃度の代表値として、床版上面における表面（0～20 mm）のデータを集計している。

塩分量調査のためのコア採取状況を写真 - 2 に、採取したコアの例を写真 - 3 に示す。

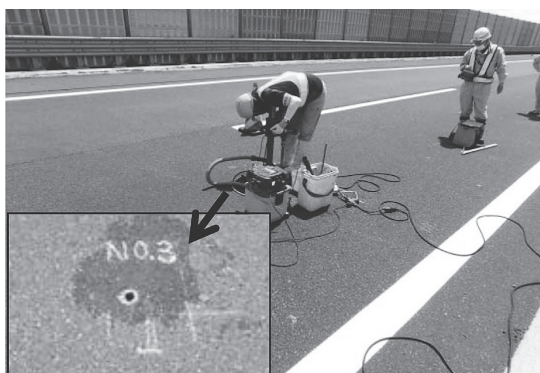


写真 - 2 塩分量調査のためのコア採取状況



写真 - 3 採取したコアの例

調査結果を分析したところ、調査箇所、凍結防止剤散布量、縦横断線形の違いなど、環境条件の違いによる傾向は確認できなかった。また、大半のデータにおいて、全塩化物イオン量は 1 kg/m^3 前後であったが、なかには突出して高い値を示すデータもあり、その要因は現時点で不明である。そこで、安全側の配慮として全調査データの「平均値 + 3 × 標準偏差」となる値 (4.88 kg/m^3) から、雪氷区間において設計に用いる標準値として、 $C_0 = 5.0 \text{ kg/m}^3$ と設定した。なお、 10 t/km^2 程度を下回る環境の路線においては、過大な設定となるおそれがあるため別途調査・分析を行う。

2.4 耐久性照査に基づく床版の材料選定例

鉄筋や PC 鋼材の防錆の要否や種別の判定は、図 - 3 に示す区分 ①～③ に分類し、それぞれの区分に対して床版上面側の鋼材を対象とした照査を行うこととした。ここで、区分 ① は接合部の鉄筋およびプレキャスト部材から接合部へ延長する橋軸方向の鉄筋、区分 ② はプレキャスト部材のみに配置される鉄筋、区分 ③ はプレキャスト部材に配置される PC 鋼材である。こうした区分は、照査の簡便性や品質管理のしやすさを考慮して、防錆仕様の使い分けが最小限となるように設定したものである。なお、図 - 3 ではループ継手を例示しているが、他の継手構造を用いる場合も同様の考え方で防錆区分を設定できる。

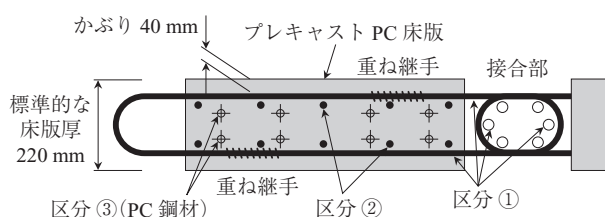


図 - 3 プレキャスト PC 床版の標準的な配筋例と照査区分

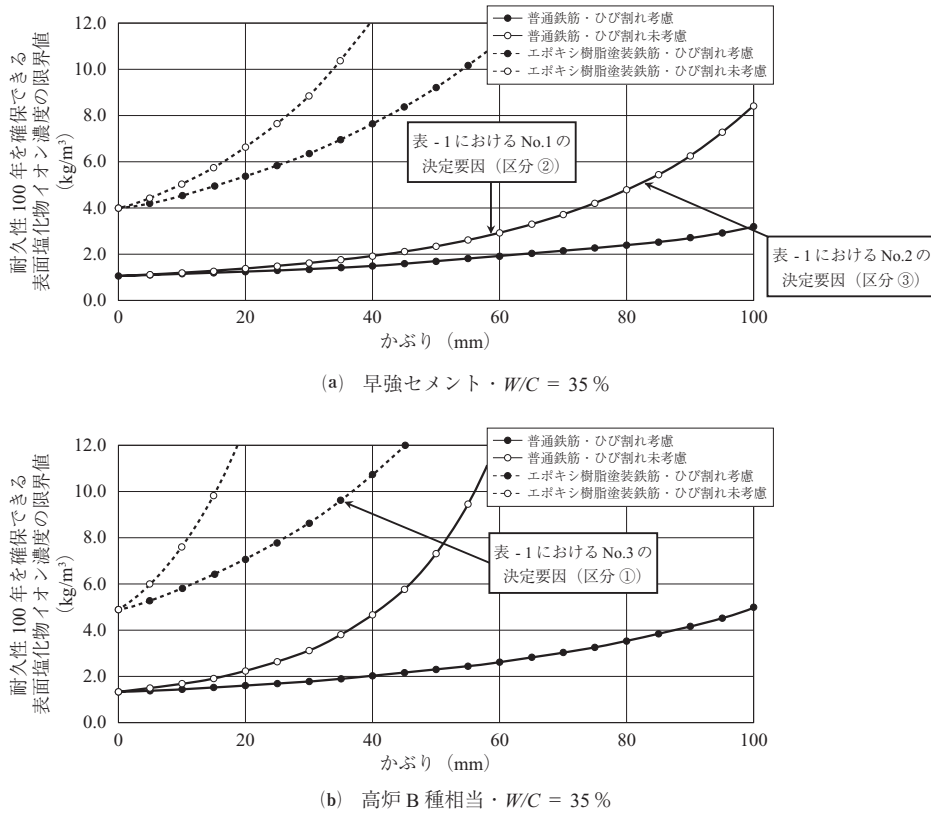


図 - 4 床版の塩害に対する耐久性照査の試算結果

表 - 1 床版の塩害に対する耐久性照査の試算例

No.	セメント種別	鋼材の防錆種別 ^{*2}			耐久性100年を確保できるC ₀ の限界値 ^{*1}
		区分①	区分②	区分③	
1	早強セメント	エポキシ樹脂塗装鉄筋	普通鉄筋 ^{*3}	普通PC鋼材	C ₀ ≤ 2.9 kg/m ³
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 ^{*4}	C ₀ ≤ 5.0 kg/m ³
3	早強セメント + 高炉スラグ微粉末	エポキシ樹脂塗装鉄筋 ^{*5}	エポキシ樹脂塗装鉄筋	普通PC鋼材	C ₀ ≤ 9.5 kg/m ³

※1 W/C = 35% で試算
 ※2 C₀ の限界値の決定要因となる鋼材区分を下線で示す。
 ※3 区分②の鋼材までのかぶり：59 mm 以上
 ※4 区分③の鋼材までのかぶり：82 mm 以上
 ※5 区分①のかぶり：場所打ち部の施工誤差を考慮して 35 mm で試算

次に、プレキャスト PC 床版の一般的な水セメント比 (35%) を用いた場合における塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対し、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について試算した結果を図 - 4 に、各材料の組合せに対する表面塩化物イオン濃度 C₀ の限界値について整理した結果を表 - 1 に示す。

本試算では、RC 構造部分 (接合部) が含まれる区分①に対してひび割れの影響を考慮し、プレキャスト PC 部材である区分②および③に対してはひび割れの影響を考慮しないものとした。表面塩化物イオン濃度やかぶりの設計値に応じて、表 - 1 に示す No.1 ~ 3 の組合せの順に耐久性照査を行い、材料選定を行うことができる。

なお、表 - 1 に示す対策で耐久性照査を満足しない場合は、ステンレス鉄筋やエポキシ樹脂被覆 PC 鋼材など、更なる高耐久材料の採用を検討する。

3. 壁高欄の耐久性照査

3.1 壁高欄の耐久性照査方法

壁高欄は、冬季に散布される凍結防止剤が飛散する影響を直接受ける。このため、塩害による劣化事例が多く、この環境作用に対する耐久性照査がとくに重要な部材である。

NEXCO 設計要領¹⁾では、耐久性を確保するための方策として、壁高欄の標準かぶりは 70 mm、ひび割れ誘発目地 (V カット目地) にはエポキシ樹脂塗装鉄筋の使用を標準としている。この対策により一定の耐久性を確保できるものと考えられるが、床版と同様に環境作用に応じた耐久性の定量的な評価方法については、検討途上である。

耐久性照査は、床版と同様に式 (1) ~ (4) により行うことができるが、壁高欄への環境作用は床版とは異なり凍結防止剤散布量と一定の相関関係があることが既往文献⁵⁾により報告されている。そこで、耐久性照査に用いる表面塩化物イオン濃度 C₀ の設計値は、この相関関係を活用して、文献 5) に基づき式 (5) により算定することとした。

$$C_0 = 0.286 \times W_s \quad (5)$$

W_s : 年間あたりの凍結防止剤散布量 (t/km)、既往の凍結防止剤散布量の実績データを用いる。ここで、式 (5) は、高速道路橋の橋梁壁高欄を対象とした調査結果に基づいて求められたものであり、これによりコンクリート表面における想定塩化物イオン濃度を算定できる可能性が高いことが、文献 5) において示されている。ただし、1 シーズンあたりの凍結防止剤散布量が 5.95 ~ 22.69 (t/km) のデー

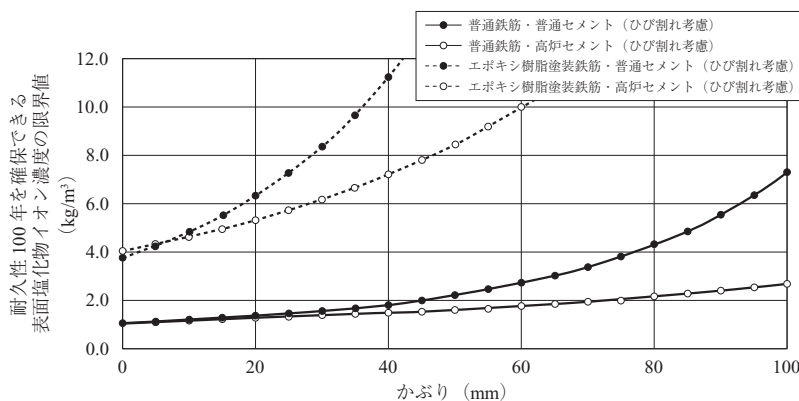


図 - 5 壁高欄の塩害に対する耐久性照査の試算結果

※ 壁高欄で標準的に用いている $W/C=50\%$ で試算
 ※ RC 部材のため、ひび割れの影響を考慮
 ※ ただし、式(3)における塩化物イオンに対する設計拡散係数 D_d は、温度ひび割れや収縮ひび割れなどの初期ひび割れに対するひび割れ幅と間隔を求めることが困難なことを考慮し、 $D_d = D_k \cdot \gamma_c \cdot \beta_{cl}$ で算出。 γ_c : コンクリートの材料係数(側面を主な対象のため=1.0), β_{cl} : 初期ひび割れの影響を考慮した係数 (=1.5)。

タに基づいているため、これを大幅に上回るような重雪氷地域においては、適用に注意が必要である。

表 - 2 壁高欄の塩害に対する耐久性照査の試算例

No.	耐久性 100 年を確保できる環境条件の限界値		対策の組合せ例	
	凍結防止剤散布量 W_s (t/km)	想定表面塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m ³)	セメント種別	鉄筋防錆種別
1	$W_s \leq 6.1$	$C_0 \leq 1.76$	普通セメント	普通鉄筋
2	$W_s \leq 9.3$	$C_0 \leq 2.68$	高炉セメント	普通鉄筋
3	$W_s \leq 34.2$	$C_0 \leq 9.80$	普通セメント	エポキシ樹脂塗装鉄筋
4	$W_s \leq 73.6$	$C_0 \leq 21.06$	高炉セメント	エポキシ樹脂塗装鉄筋

※ $W/C = 50\%$, $c_d = 60$ mm (設計かぶり 70 mm に対して施工時の許容誤差 10 mm を考慮), $C_0 = 0.286 \times W_s$ を用いて試算

3.2 耐久性照査結果に基づく壁高欄の材料選定例

壁高欄の耐久性照査結果を図 - 5 に、鋼材の防錆対策や混和材を用いた耐久性向上対策の組合せに対する表面塩化物イオン濃度 C_0 の限界値を試算した例を表 - 2 に示す。この手法により、凍結防止剤散布量やかぶりの設計値に応じて、壁高欄の耐久性を確保するための対策を選定できる。

4. おわりに

本稿では、現地調査結果に基づいて凍結防止剤散布の影響を評価し、床版や壁高欄の耐久性照査を行う際の考え方や、その照査結果例について報告した。本稿の内容をまとめると次のとおりである。

- (公社) 土木学会や (公社) プレストレストコンクリート工学会が定めた規準^{2)~4)}を活用することにより、エポキシ樹脂塗装鉄筋、ステンレス鉄筋、および高炉スラグ微粉末などを使用したコンクリートに対しても、塩害に対する耐久性照査が可能であることを示した。なお、本稿では具体例を示していないが、混和材にフライアッシュを用いた場合も同様の手法

で照査可能である。

- 床版に対する凍結防止剤散布の影響については、既設橋の塩分量調査結果に基づいて設定する考え方の一例を示した。
- 本稿では、NEXCO 中日本が管理する雪氷区間における約 1 200 箇所の調査データを用い、更新床版の設計で用いる標準値として、表面塩化物イオン濃度 $C_0 = 5.0$ kg/m³ と設定した。
- 表面塩化物イオン濃度 C_0 に応じて更新床版の耐久性を確保するための材料選定例を示した。
- 壁高欄に対しては、凍結防止剤散布量との相関関係を用いて耐久性照査を行う手法を示すと同時に、耐久性を確保するための材料選定例を示した。

今後も引続き既設床版や撤去床版の調査・分析を進めることにより、表面塩化物イオン濃度の設定方法や材料選定方法について精度向上を図る予定であるが、本稿が、床版や壁高欄の耐久性照査に基づく材料選定を行う際に、参考になれば幸いである。

参考文献

- NEXCO 東日本・中日本・西日本: 設計要領第二集 [橋梁保全編], 2017.7
- (公社) プレストレストコンクリート工学会: 更新用プレキャスト PC 床版 技術指針, p70, pp.92~99, 2016.3
- (公社) 土木学会: 2012 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編: 標準], pp.148~157, 2012.12
- (公社) 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 [改訂版], コンクリートライブラリー第 112 号, pp.10~16, 2003.11
- 酒井秀昭: 凍結防止剤散布地域の橋梁壁高欄の塩化物イオン濃度の予測方法に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.66, pp.268~275, 2010.7

【2017 年 10 月 31 日受付】