

高炉スラグ微粉末の有無によるコンクリート製壁高欄の塩害に対する耐久性の比較について

開発虎ノ門コンサルタント(株) フェロー会員 ○上平 謙二  
 中日本高速道路(株) 正会員 青木 圭一  
 (株) デイ・シイ 蝦名 貴之  
 開発虎ノ門コンサルタント(株) 西本 英生

1. 目的

積雪寒冷地に建設される高速道路橋では、剛性防護柵(コンクリート製壁高欄)(以下、壁高欄という)は、既往の研究で、高炉スラグ微粉末(以下、スラグという)を混入することで、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する耐久性を改善できるとの報告がある<sup>1),2),3)</sup>。

本報告では、コンクリート標準示方書「土木学会、2017年制定」(以下、コン示という)に準拠し、フィックの拡散方程式を基本として、早強ポルトランドセメント(以下、早強セメントという)にスラグを混入したプレキャスト壁高欄(以下、PCa壁高欄という)、普通ポルトランドセメント(以下、普通セメントという)を用いた場所打ち壁高欄及び早強セメントを用いたPCa壁高欄における塩化物イオンの侵入に関する計算を行い、また、鉄筋にエポキシ樹脂塗装鉄筋(以下、エポ筋という)を用いたそれぞれの壁高欄についても塩化物イオンの侵入に関する計算を行い、スラグの有無による耐久性の違いを比較したので、その内容を報告する。

2. 対象とした各壁高欄の物性

スラグを混入したPCa壁高欄は、設計基準強度：40 N/mm<sup>2</sup>、コンクリートの目標スランプ：21 cm、水セメント比：40%、空気量：4.5%であり、セメントは、早強セメントを使用し、スラグ4000を30%混合している。本PCa壁高欄コンクリートの配合を表-1に示す。また、普通セメントを用いた場所打ち壁高欄コンクリートは、設計基準強度：30 N/mm<sup>2</sup>、水セメント比：50%とし、早強セメントを用いたPCa壁高欄コンクリートは、設計基準強度：40 N/mm<sup>2</sup>、水セメント比：40%と設定した。

表-1 スラグを混入したコンクリートの配合

コンクリートの種類	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
		W	H	BF	S	G	Ad
40-21-25 (H4000B-30%)	40	170	298	128	783	915	3.84

注) Ad：ポリカルボン酸エーテル系の高性能AE減水剤

3. 普通鉄筋を用いた場合の耐久設計の方法

コン示に準じ、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査は、式-1によった。

$$\gamma_i \frac{C_d}{C_{lim}} \leq 1.0 \quad \dots \dots \dots \text{式-1}$$

ここに、 $\gamma_i$ は構造物係数で、ここでは、鉄筋の発錆に伴う壁高欄の安全性を考慮して1.1を採用<sup>4)</sup>、 $C_d$ は鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値(kg/m<sup>3</sup>)、 $C_{lim}$ は耐久設計で設定する鋼材腐食発生限界濃度(kg/m<sup>3</sup>)である。また、鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値の計算は、コン示に準じ、式-2によった。

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

ここに、 $\gamma_{cl}$ は鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値( $C_d$ )のばらつきを考慮した安全係数で1.3とし、 $C_0$ はコンクリート表面における塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)、 $c_d$ は耐久性に関する照査に用いるかぶりの設計値(mm)、 $D_d$ は塩化物イオンに対する設計拡散係数(cm<sup>2</sup>/年)、 $t$ は塩化物イオンの侵入に対する耐用年数(年)で100年と設定、 $C_i$ は初期塩化物イオン濃度(kg/m<sup>3</sup>)で0.3 kg/m<sup>3</sup>と設定、 $\operatorname{erf}$ は誤差関数である。

4. エポ筋を用いた場合の耐久設計の方法

エポ筋を使用した鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値の計算は、式-3によった。

ここに、式-2以外で、 $C_{ep}$ はエポキシ樹脂塗装の厚さの期待値(mm)で220 $\mu$ mと設定<sup>4),5)</sup>、 $D_{epd}$ はエポキシ

キーワード：剛性防護柵、高炉スラグ微粉末、遮塩性、コンクリートかぶり、耐久設計

連絡先：〒170-0005 東京都豊島区南大塚3-20-6 開発虎ノ門コンサルタント(株) TEL：03-3985-5497

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1}{2\sqrt{t}} \left( \frac{C_d}{\sqrt{D_d}} + \frac{C_{ep}}{\sqrt{D_{epd}}} \right) \right) \right) + C_i \quad \dots \dots \dots \text{式-3}$$

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 (cm<sup>2</sup>/年) で 2.0×10<sup>-6</sup> cm<sup>2</sup>/年と設定<sup>4),5)</sup>。

5. 耐久設計の各設計用値

表-2 各壁高欄コンクリートの耐久設計のための設計用値

壁高欄コンクリートの種類	W/C	$\gamma_i$	$C_{lim}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{cl}$	$C_d$ (mm)	$D_d$ (cm <sup>2</sup> /年)	$t$ (年)	$C_{ep}$ (μm)	$D_{epd}$ (cm <sup>2</sup> /年)
早強セメント+高炉スラグ使用 PCa 壁高欄	0.4	1.1	2.06	1.3	5	0.130	100	220	2×10 <sup>-6</sup>
普通セメント使用 場所打ち壁高欄	0.5	1.1	1.90	1.3	10	0.501	100	220	2×10 <sup>-6</sup>
早強セメント使用 PCa 壁高欄	0.4	1.1	2.20	1.3	5	0.251	100	220	2×10 <sup>-6</sup>

各壁高欄コンクリートの耐久設計のための設計用値を整理すると、表-2の通りとなる。  
 ここで、鋼材腐食発生限界濃度 ( $C_{lim}$ ) の計算については、コン示に準じ、早強セメントにスラグを混入した PCa 壁高欄コンクリートは、高炉セメントを用いた式で計算し<sup>2)</sup>、普通セメントを用いた場所打ち壁高欄コンクリートと早強セメントを用いた PCa 壁高欄コンクリートは、それぞれ普通セメントを用いた式で計算したが、それらの値は、水セメント比の影響が大きいことが分かる。かぶりの設計値 ( $c_d$ ) は、NEXCO の規定に準じた<sup>1),4)</sup>。また、塩化物イオンに対する設計拡散係数 ( $D_d$ ) について、スラグ混入コンクリートは、既往の報告に準じ<sup>2)</sup>、普通セメント及び早強セメントを用いた場合は、コン示に準じて普通セメントを使用したコンクリートの式で計算した。 $C_{ep}$  と  $D_{epd}$  の値は、既往の報告に準じた<sup>4),5)</sup>。

6. 耐久設計結果及び考察

表-2 の設計用値を用い、式-2 及び式-3 で計算した各壁高欄の耐久設計の結果を図-1 及び図-2 に示す。

図-1 の各壁高欄の 100 年耐久性が確保されるコンクリート表面の塩化物イオン濃度の限界値の結果では、スラグ混入の壁高欄は、普通セメントを使用した場所打ち壁高欄に比べ、高い耐久性を示し、また、早強セメントを使用した PCa 壁高欄のかぶり 70mm の結果と比べても高い耐久性を示している。一方、図-2 に普通セメントを使用した場所打ち壁高欄での普通鉄筋及びエポ筋を用いた場合の結果を示したが、コンクリート表面の塩化物イオン濃度次第では、エポ筋を使用しても 100 年耐久性を満足しない場合がある結果を得た。因みに、スラグ混入壁高欄では、コンクリートかぶり 50mm におけるエポ筋使用限界は、コンクリート表面塩化物イオン濃度で 20kg/m<sup>3</sup> を超える結果であった。

最後に、本報告を纏めるにあたり、東京工業大学 環境・社会理工学院の岩波光保教授に多大なる助言を頂きましたこと、紙面をお借りして感謝します。

参考文献

- 1) DAK 式プレキャスト壁高欄「設計・施工ガイドライン〔改訂 版〕」, DAK 式プレキャスト壁高欄工法研究会 (2019 年 9 月)
- 2) 上平謙二, 青木圭一, 二戸信和: 塩害を受ける剛性防護柵のコンクリートかぶりに対する耐久性評価, 「橋梁と基礎」Vol.155, No.4, pp.47~52 (2021 年 4 月)
- 3) 上平謙二, 青木圭一: 高炉スラグ微粉末を混入したプレキャスト壁高欄の塩害に対する耐久性について, 土木学会全国大会第 76 回年次学術講演会, V-371 (2021 年 9 月)
- 4) 中日本高速道路株式会社: 壁高欄の塩害に対する耐久性照査方法(案) (平成 29 年 4 月)
- 5) 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 年 11 月)

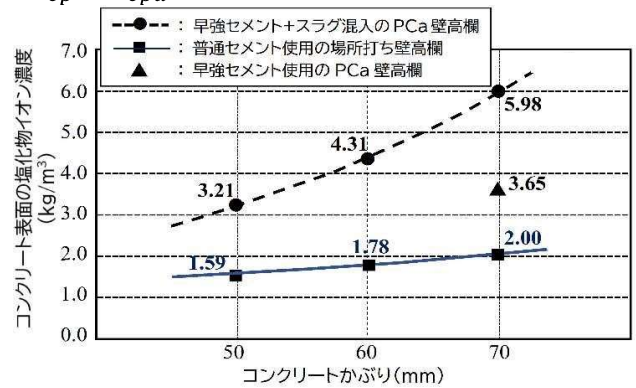


図-1 各壁高欄の 100 年耐久性の比較

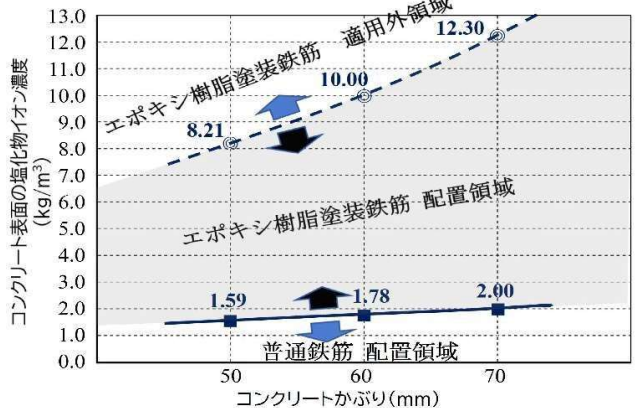


図-2 場所打ち壁高欄の 100 年耐久性の比較