

# 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

Evaluation of Durability to the Concrete Cover of Stiff Guard Fence under Salinity Environment

Uehira Kenji  
上 平 謙 二\*

Aoki Keiichi  
青 木 圭 一\*\*

Nito Nobukazu  
二 戸 信 和\*\*\*

\* 開発虎ノ門コンサルタント（株）技術統括部 技師長 工博

\*\* 中日本高速道路道路（株）名古屋支社 保全・サービス事業部 副部長 工博

\*\*\*（株）デイ・シイ 技術センター 主査 工博

（『橋梁と基礎』Vol. 55, No. 4, 2021年4月号より抜刷）

# 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

Evaluation of Durability to the Concrete Cover of Stiff Guard Fence under Salinity Environment

Uehira Kenji 上平謙二\* Aoki Keiichi 青木圭一\*\* Nito Nobukazu 二戸信和\*\*\*

## はじめに

積雪寒冷地に建設された高速道路橋においては、凍結防止剤が散布されるため、過去に施工された剛性防護柵（コンクリート製壁高欄）（以下、壁高欄）は、塩分浸透の影響で、壁高欄に配置された鉄筋が錆び、かぶりコンクリートにひび割れが入り、耐久性低下に繋がる事例が散見されている。

このような環境の中、上記壁高欄では、場所打ちコンクリートであってもプレキャストコンクリートであっても、コンクリートかぶり（以下、かぶり）を一律70 mmと設定している。また、「道路橋示方書」においては、塩害の影響を受ける度合いとして、影響を受ける対策区分Ⅱにおいて、鉄筋コンクリート構造では、かぶり70 mmで100年耐久の表記がある。

しかしながら、壁高欄に付着する凍結防止剤による塩分濃度の状況を含めた具体的な耐久性の知見が少なく、どの程度の壁高欄表面の塩分濃度によって塩分浸透を受けた場合に、鉄筋位置で塩分濃度が鋼材腐食発生限界濃度に対して100年耐久としているのか、具体的な報告はほとんど見受けられない。

そこで、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、コンクリート標準示方書）に準拠し、フィックの拡散方程式を用い、普通ポルトランドセメントを用いた一般的な場所打ち壁高欄の塩分浸透に対する100年耐久を検証するとともに、高炉スラグ微粉末を混合したプレキャスト壁高欄の100年耐久に必要なかぶりについても検証を行い、場所打ち壁高欄と高炉スラグ微粉末を混合したプレキャスト壁高欄の100年耐久に関する必要かぶりの相対的な比較検証により、高速道路橋の更なる高耐久化について考察を行うものである。

## 1. 塩害を受けた場所打ち壁高欄コンクリートの塩分浸透と塩化物イオンの見掛けの拡散係数

凍結防止剤（主にNaCl）の影響を大きく受けた既存の壁高欄（高速道路橋、普通ポルトランドセメント使用）に対して、JSCE-G573-2007に準じ、ランダムにコア抜きした試料から、壁高欄表面からの深さに対する塩化物イオン濃度を分析した結果を表-1<sup>1)</sup>に示す。

なお、これら3橋の壁高欄に使用された場所打ちコンク

表-1 既設壁高欄の塩分分析結果

橋梁名	経過年数 (年)	塩化物イオン濃度 (kg/m <sup>3</sup> )				
		試料採取位置 (mm)				
		0~20	20~40	40~60	60~80	80~100
A橋	25	5.564	6.327	2.743	1.098	0.672
B橋	16	5.205	6.225	3.892	1.646	—
C橋	35	6.187	5.812	3.217	2.285	—

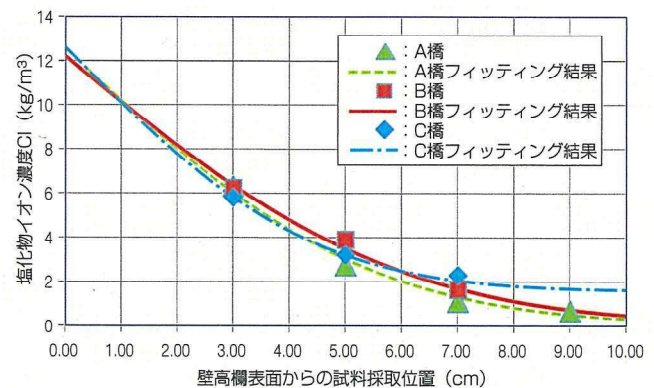


図-1 塩化物イオン濃度と試料採取位置との関係

表-2 フィックの拡散方程式による計算結果

橋梁名	経過年数 t (年)	コンクリート表面の全塩化物イオン濃度 C <sub>0</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	見掛けの拡散係数 D <sub>c</sub> (cm <sup>2</sup> /年)	初期塩化物イオン濃度 C <sub>i</sub> (kg/m <sup>3</sup> )
A橋	25	12.46	0.354	0.10
B橋	16	12.10	0.670	0.10
C橋	35	11.05	0.170	1.57

リートは、同一の種類で、設計基準強度も同一である。

表-1の結果を基に、式(1)に示すフィックの拡散方程式を用いたフィッティング結果と塩化物イオンの見掛けの拡散係数の計算結果をそれぞれ図-1<sup>1)</sup>および表-2<sup>1)</sup>に示す。

$$C(x, t) = C_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{0.1 \cdot x}{2 \sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right] + C_i \quad (1)$$

ここに、 $C(x, t)$ : コンクリート表面からの距離  $x$  における塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)、 $x$ : コンクリート表面からの距離 (mm)、 $t$ : 経過年数 (年)、 $C_0$ : 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>)、 $\operatorname{erf}$ : 誤差関数、 $D_c$ : コンクリートの塩化物イオンに対する見掛けの拡散係数 (cm<sup>2</sup>/年)、 $C_i$ : 初期塩化物イオン濃度 (kg/m<sup>3</sup>)

図-1の既存の壁高欄における塩化物イオン濃度と試料採取位置の関係であるが、表面の塩分濃度に関する環境条件の相違も考えられるが、既往の研究<sup>2),3)</sup>と類似した関

\* 開発虎ノ門コンサルタント(株) 技術統括部 技師長 工博  
 \*\* 中日本高速道路(株) 名古屋支社 保全・サービス事業部 副部長 工博  
 \*\*\* (株)ディ・シー 技術センター 主査 工博

キーワード: 塩害, 剛性防護柵, コンクリートかぶり, 耐久性

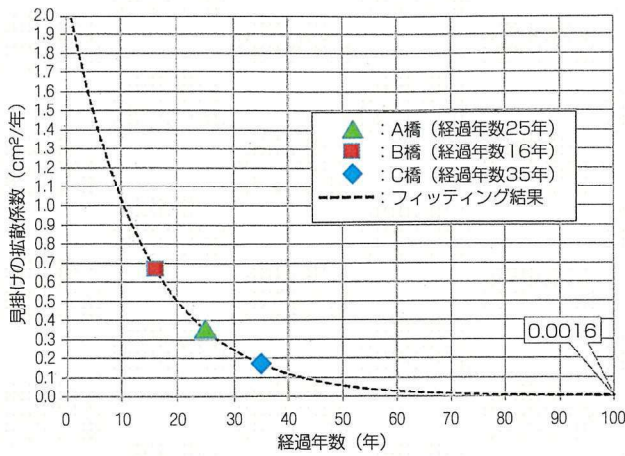


図-2 各橋梁の見掛けの拡散係数と経過年数の関係

係が認められた。

また、図-1のフィッティング結果については、表-1の塩化物イオン濃度の試料結果に対し、壁高欄表面付近では中性化の影響があるとし、かぶり0~20 mmの結果を除外した結果としている。

表-2のフィックの拡散方程式による計算結果を基に、各橋梁の経過年数と見掛けの拡散係数との関係をフィッティングした結果が図-2<sup>1)</sup>である。

なお、このフィッティングについては、見掛けの拡散係数を100年ではほぼ0に収束すると仮定している。

図-2の見掛けの拡散係数に関するフィッティング結果を水セメント比と経過年数の関係で表したものが式(2)<sup>1)</sup>である。

$$\log_{10} D_c(t) = \left( 3.0 \cdot \left( \frac{W}{C} \right) - 1.8 \right) \cdot (0.1045 \cdot t - 1.098) \quad (2)$$

ここに、 $D_c(t)$ ：経過年数 ( $t$ 年) における見掛けの拡散係数 ( $\text{cm}^2/\text{年}$ )、 $W/C$ ：コンクリートの水セメント比 (= 0.5)、 $t$ ：経過年数 (年)

ここで、水セメント比を0.5としたのは、既存の場所打ち壁高欄コンクリートの水セメント比を調査すると、おおむね、0.47~0.54の範囲にあり、この平均的な値として0.5を採用したものである。

## 2. 高炉スラグ微粉末を混合したプレキャスト壁高欄コンクリートの塩分浸透と見掛けの拡散係数

高炉スラグ微粉末を混合したプレキャスト壁高欄については、DAK式プレキャスト壁高欄<sup>1)</sup> (以下、PCa壁高欄)があるため、このPCa壁高欄を例にとって検証する。

### 2-1 コンクリート材料および配合<sup>4),5)</sup>

PCa壁高欄は、コンクリートの設計基準強度を40N/mm<sup>2</sup>で設計しており、コンクリートの目標スランプを21 cmとし、水セメント比40%、空気量を4.5%としている。

表-3にPCa壁高欄のコンクリートの配合を示す。なお、セメントは、早強ポルトランドセメントを使用し、高

表-3 本壁高欄のコンクリート配合

コンクリートの種類	W/C (%)	単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )					
		W	H	BF	S	G	AD
40-21-25 (H4000B-30%)	40	170	298	128	783	915	3.84

炉スラグ微粉末4000を30%混合している。

## 2-2 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

### (1) 試験方法

試料は、表-3に示したコンクリート配合で製作されたφ100×200 mmの円柱供試体を用い、電子線マイクロアナライザ (EPMA) による面分析を行った<sup>5)</sup>。

本方法は、JSCE-G574「EPMA法によるコンクリート中の元素の面分析方法」に従い実施したものである。

また、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、JSCE-G572「浸漬によるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法」に従い、20℃±2℃、濃度10%の塩化ナトリウム水溶液中に182日間浸漬したφ100×200 mmの円柱試験体より算出している。

### (2) 塩化物イオン濃度

塩化物イオン濃度 (以下、Cl濃度) 分布曲線は、表面を0 cmとして深さ方向に0.01 cm (1ピクセル分) ごとに、面分析画像の横方向の領域におけるコンクリート部分のピクセルを抽出し、それらのCl濃度の平均値を求め、これを深さに対してプロットすることにより作成している。

### (3) 塩化物イオンの見掛けの拡散係数

得られたCl濃度分布曲線から、式(1)のフィックの拡散方程式を用いて浸漬試験による塩化物イオンの見掛けの拡散係数 ( $D_c$ ) と試料表面の塩化物イオン濃度 ( $C_0$ ) を求めている。

なお、Cl濃度分布曲線のうち、拡散係数の計算に採用した範囲は、Cl濃度が最大となった位置よりも内部側全体としている。

182日間の浸漬試験の結果ではあるが、PCa壁高欄

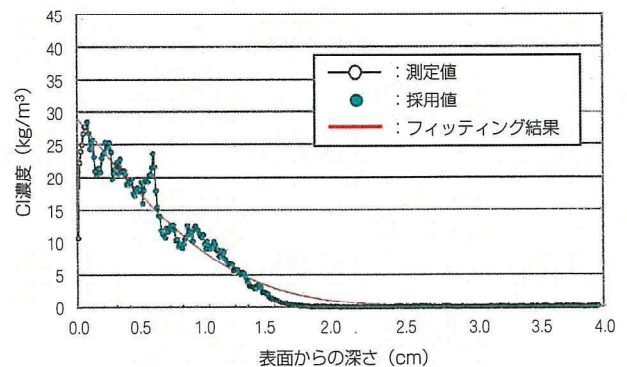


図-3 本壁高欄コンクリートのCl濃度分布

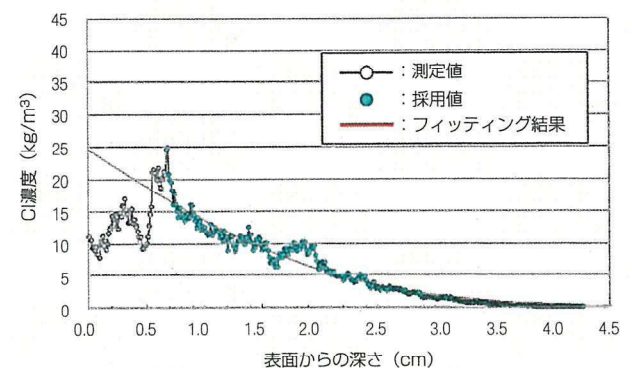


図-4 普通コンクリートのCl濃度分布

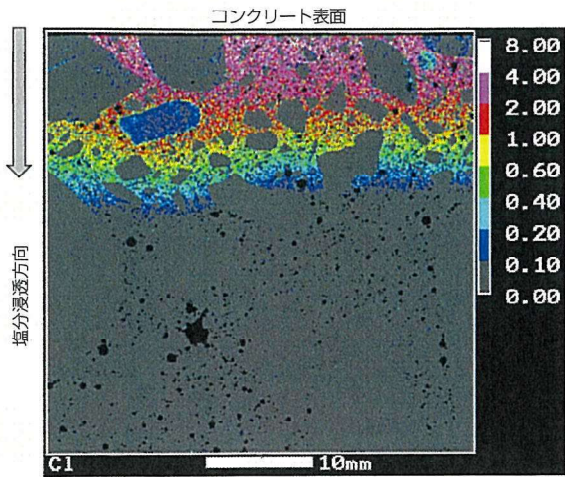


図-5 本壁高欄 (H+BF) の面分析結果

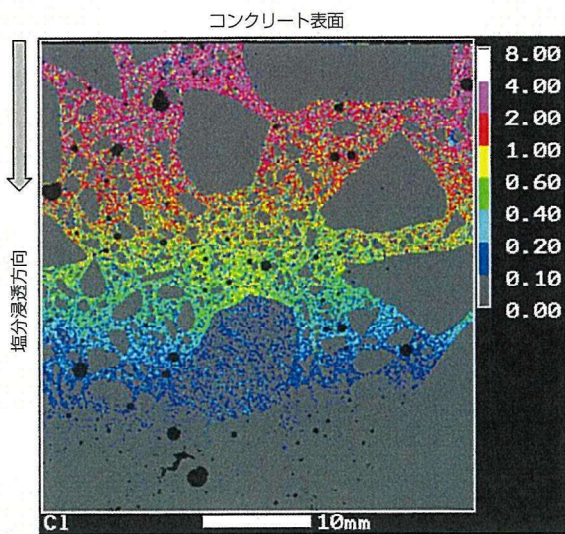


図-6 普通コンクリート (N) の面分析結果

表-4 フィックの拡散方程式による計算結果

試験体名	経過年数 $t$ (年)	コンクリート表面の全塩化物イオン濃度 $C_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	見掛けの拡散係数 $D_c$ (cm <sup>2</sup> /年)	初期塩化物イオン濃度 $C_i$ (kg/m <sup>3</sup> )
H+BF	0.498	31.9	0.534	0.09
N	0.498	24.5	2.840	0.14

メント比 ( $W/C$ ) を0.5として式(2)で普通コンクリートの見掛けの拡散係数を計算すると、 $D_c = 2.060 \text{ cm}^2/\text{年}$ となる。この結果は、表-4の普通コンクリートの見掛けの拡散係数 ( $D_c = 2.840 \text{ cm}^2/\text{年}$ )の結果と比較的よく一致していると思われることから、表-1に示した3橋という少ない試料による試験結果ではあるが、図-2の実橋壁高欄の見掛けの拡散係数と経過年数のフィッティング結果は、ある程度妥当性のある結果であると推察される。

### 3. 普通コンクリートとPCa壁高欄コンクリートの見掛けの拡散係数の相関性

ここまで、実際に塩害を受けた普通コンクリートの見掛けの拡散係数とPCa壁高欄の見掛けの拡散係数をそれぞれ計算してきたが、普通コンクリートの見掛けの拡散係数は、3橋の経過年数に対する試験結果であり、一方、PCa壁高欄の見掛けの拡散係数は、182日間の浸漬試験の結果であり、両者の壁高欄が有する見掛けの拡散係数に関する相関性を議論する必要がある。

このことから、普通コンクリートとPCa壁高欄コンクリートの耐久性に関する相関性を議論するため、式(1)のフィックの拡散方程式で表される経過年数 ( $t$ ) を一つの指標として、そのときの各コンクリートの見掛けの拡散係数を比較することが重要であると考えられる。

#### 3-1 普通コンクリートの見掛けの拡散係数の経過年数の評価

普通コンクリートの見掛けの拡散係数に対する経過年数の評価として、土木学会が推奨する塩化物イオン拡散係数の特性値を一つの指標とした。

「コンクリート標準示方書」によると、コンクリートの塩化物イオン拡散係数の特性値は、コンクリートの水セメント比との関係式で表され、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの場合は、式(3)で計算できるとしている。

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

ここに、 $D_k$ :見掛けの拡散係数の特性値 (cm<sup>2</sup>/年)、 $W/C$ :コンクリートの水セメント比

ここで、式(3)に用いる水セメント比は、前述のとおり、既存の場所打ち壁高欄コンクリートの平均的な値として、 $W/C = 0.5$ として塩化物イオン拡散係数の特性値を計算すると、 $D_k = 0.501 \text{ cm}^2/\text{年}$ と計算される。

この拡散係数の特性値を用いて、既存の壁高欄の塩分調査から導かれた見掛けの拡散係数と経過年数の関係式(式(2))を用いて経過年数を計算すると、おおむね20年と計算される。

このことから、塩害を受ける普通コンクリートを用いた壁高欄が20年経過したときの見掛けの拡散係数として、 $D_k = 0.501 \text{ cm}^2/\text{年}$ を一つの指標とする。

(H+BF)の試料によって得られたCl濃度分布曲線の結果の一例を図-3に示す。

また、比較のために実施した普通ポルトランドセメントを用い、設計基準強度30 N/mm<sup>2</sup>、スランプ8 cm、水セメント比 ( $W/C$ ) 44%で配合した普通コンクリート (N) のCl濃度分布曲線の結果の一例を図-4に示す。

参考として、電子線マイクロアナライザ (EPMA) による面分析結果として、PCa壁高欄 (H+BF) と普通コンクリート (N) の結果の一例を図-5, 6にそれぞれ示す。

図-3~6までの結果から明らかなように、高炉スラグ微粉末を混合したPCa壁高欄は、普通ポルトランドセメントを用いた壁高欄に比べ、塩分が浸透しにくいことが分かる。

そして、PCa壁高欄コンクリートと普通コンクリートの複数の試験結果に対して、式(1)のフィックの拡散方程式で計算した結果のそれぞれの平均値が表-4である。

表-4の結果から、182日間 (0.498年) の浸漬試験結果ではあるが、見掛けの拡散係数の比較では、PCa壁高欄は、普通コンクリートを用いた壁高欄に比べ、極めて遮塩性が高いことが分かる。

ここで、表-4の経過年数 (0.498年) を用いて、水セ

### 3-2 普通コンクリートとPCa壁高欄コンクリートの見掛けの拡散係数の相関性

普通コンクリートとPCa壁高欄コンクリートの塩害に対する耐久性を評価する場合、両者の経過年数を統一した見掛けの拡散係数を評価することが重要である。

そのため、PCa壁高欄コンクリートにおける経過年数20年での見掛けの拡散係数を検討する。

図-2に示した普通コンクリートの見掛けの拡散係数と経過年数の関係を基に、EPMA試験によって得られた182日（以下、0.498年）浸漬のPCa壁高欄コンクリートの見掛けの拡散係数が、20年の経過とともに、どのように変化するかを推定する。

推定方法は、図-2の普通コンクリートの見掛けの拡散係数と経過年数のフィッティング結果に対して、PCa壁高欄コンクリートで得られた0.498年浸漬での見掛けの拡散係数 ( $D_c = 0.534 \text{ cm}^2/\text{年}$ ) が20年の経過に対し、前記のフィッティング結果と相似した経過をたどると推定することによって、その相似曲線に対して、経過年数20年時の見掛けの拡散係数をPCa壁高欄の耐久性評価のための見掛けの拡散係数と考えた。

つまり、PCa壁高欄では、0.498年経過の見掛けの拡散係数のみが既知であるため、普通コンクリートの見掛けの拡散係数曲線に相似なPCa壁高欄コンクリートの見掛けの拡散係数曲線を検討するため、まず、普通コンクリートの0.498年時の見掛けの拡散係数を式(2)で計算した。結果は、前述でも示したが、 $D_c = 2.060 \text{ cm}^2/\text{年}$ となる。したがって、0.498年時の両者の見掛けの拡散係数の比を求めると、 $2.060/0.534 = 3.858$ となる。

この比を用いて、式(2)のフィッティング曲線の値をこの比で除した値をPCa壁高欄コンクリートの見掛けの拡散係数とした。

結果、経過年数20年でのPca壁高欄コンクリートの見掛けの拡散係数は、 $D_c = 0.130 \text{ cm}^2/\text{年}$ となった。

そのときのPCa壁高欄の見掛けの拡散係数曲線を図-7に示す。

ここで、PCa壁高欄コンクリートの見掛けの拡散係数  $D_c = 0.130 \text{ cm}^2/\text{年}$ の信頼性について検証する。

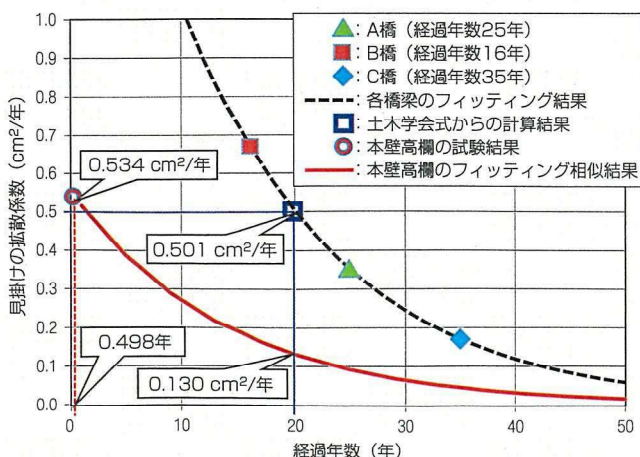


図-7 普通コンクリートと本壁高欄コンクリートの見掛けの拡散係数の相関

既往の研究<sup>2)</sup>によると、高炉スラグ微粉末4000を混入した普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの長期海洋暴露試験結果として、7.9年の試験結果から、経過年数と見掛けの拡散係数の関係が示されているが、高炉スラグ微粉末の混入率が20%の場合の見掛けの拡散係数は、おおむね  $0.4 \text{ cm}^2/\text{年}$ で、40%の場合では、おおむね  $0.2 \text{ cm}^2/\text{年}$ となっており、このことから、PCa壁高欄として混入率が30%の場合の見掛けの拡散係数を推測すると、おおむね  $0.3 \text{ cm}^2/\text{年}$ となる。この見掛けの拡散係数は、時間が経過すると低下することが知られているとも記されている。

この結果とPCa壁高欄を比較すると、PCa壁高欄で得られた見掛けの拡散係数は、早強ポルトランドセメントを使用し、高炉スラグ微粉末を30%置換した設計基準強度  $40 \text{ N/mm}^2$ のコンクリートで、濃度10%の塩化ナトリウム水溶液中に浸漬した結果であり、前記で示した海洋暴露の試験体と比べ、強度や浸漬する塩分濃度による差はあるものの、図-7に示すPCa壁高欄の見掛けの拡散係数に関する相似曲線において、7.9年経過したときの見掛けの拡散係数は、おおむね  $0.3 \text{ cm}^2/\text{年}$ となり、既往の論文<sup>2)</sup>と比較してもよい一致を示していることから、PCa壁高欄の見掛けの拡散係数曲線は、ある程度信頼性のある曲線であると考えられる。

### 4. 普通コンクリートと高炉スラグ微粉末を混合したコンクリートの耐久性の評価

#### 4-1 普通コンクリートの耐久性の評価

普通コンクリートの耐久性の評価については、土木学会式より計算した普通コンクリートの塩化物イオンの見掛けの拡散係数の特性値 ( $D_k = 0.501 \text{ cm}^2/\text{年}$ )を基本として、そのときのかぶり70 mm位置の鉄筋に対し、100年で鉄筋が腐食発生限界濃度に達するときのコンクリート表面における塩化物イオン濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )を耐久性を議論する一つの指標として、フィックの拡散方程式(式(1))から計算することとする。

#### (1) 鋼材腐食発生限界濃度

「コンクリート標準示方書」によると、耐久設計で設定する普通ポルトランドセメントを用いた場合の鉄筋の鋼材腐食発生限界濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )は、式(4)で計算してよいとしている。

$$C_{lim} = -3.0(W/C) + 3.4(0.3 \leq W/C \leq 0.55) \quad (4)$$

ここに、 $C_{lim}$ : 鋼材腐食発生限界濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $W/C$ : 水セメント比 (=0.5)

水セメント比については、式(3)で用いた実績を考慮した値として0.5を用いる。

したがって、式(4)より、普通コンクリートの鋼材腐食発生限界濃度を計算すると、 $C_{lim} = 1.9 \text{ kg/m}^3$ となる。

#### (2) 経過年数100年時のコンクリート表面塩化物イオン濃度

普通コンクリートの100年耐久を検証するにあたって、経過年数100年におけるコンクリート表面の塩化物イオン濃度 ( $C_0$ )がどの程度になるかをフィックの拡散方程

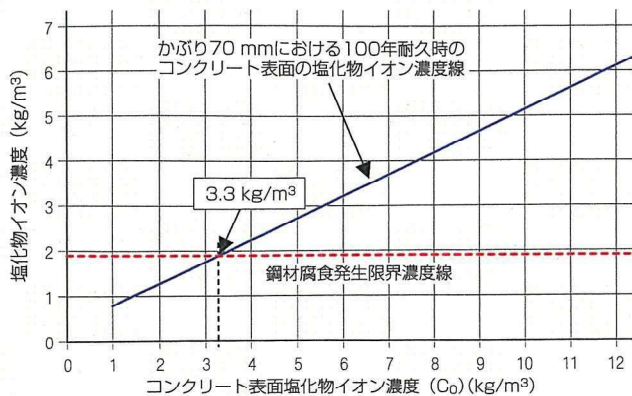


図-8 普通コンクリートの100年耐久時のコンクリート表面塩化物イオン濃度

式(式(1))より計算する。

計算方法は、ひび割れの無い普通コンクリートとし、計算された見掛けの拡散係数 ( $D_c = 0.501 \text{ cm}^2/\text{年}$  (特性値を用いる)) を有するコンクリートで、鉄筋かぶり70 mm位置において、100年で鋼材腐食発生限界濃度 (=  $1.9 \text{ kg/m}^3$ ) に達する条件とする。また、この場合の初期塩化物イオン濃度を、 $C_i = 0.3 \text{ kg/m}^3$  とする。

これらの条件を基に、式(1)のフィックの拡散方程式を用いてコンクリート表面塩化物イオン濃度を計算すると図-8のとおりとなる。

図-8より、経過年数100年におけるコンクリート表面の塩化物イオン濃度は、 $C_0 = 3.3 \text{ kg/m}^3$  と計算される。

この経過年数100年におけるコンクリート表面の塩化物イオン濃度 ( $C_0 = 3.3 \text{ kg/m}^3$ ) については、既往の研究結果<sup>6)</sup>と比較しても、よく類似した結果になっている。

#### 4-2 PCa壁高欄コンクリートの耐久性の評価

PCa壁高欄コンクリートの耐久性評価については、4-1で計算した経過年数100年における普通コンクリートの表面塩化物イオン濃度 ( $C_0 = 3.3 \text{ kg/m}^3$ ) を一つの基本条件とする。

PCa壁高欄コンクリートと普通コンクリートでは、塩分の浸透履歴は異なるが、PCa壁高欄コンクリートにおいても、コンクリートの表面塩化物イオン濃度を  $C_0 = 3.3 \text{ kg/m}^3$  と仮定して、PCa壁高欄に対し、ひび割れが無いとした場合の100年耐久の検証を行う。

この場合、PCa壁高欄に対して、見掛けの拡散係数とコンクリートかぶりを変数とし、式(1)のフィックの拡散方程式を用いて耐久性の評価を試みる。

##### (1) 鋼材腐食発生限界濃度

PCa壁高欄コンクリートは、早強ポルトランドセメントを使用し、高炉スラグ微粉末4000を30%混合し、設計基準強度を  $40 \text{ N/mm}^2$  として配合したコンクリートである。

この場合のコンクリートの鋼材腐食発生限界濃度の計算については、「コンクリート標準示方書」によると、セメントの種類として、高炉セメントB種相当を用いた場合と早強ポルトランドセメントを用いた場合の2種類考えられる。

そこで、PCa壁高欄の配合と高炉セメントB種相当を

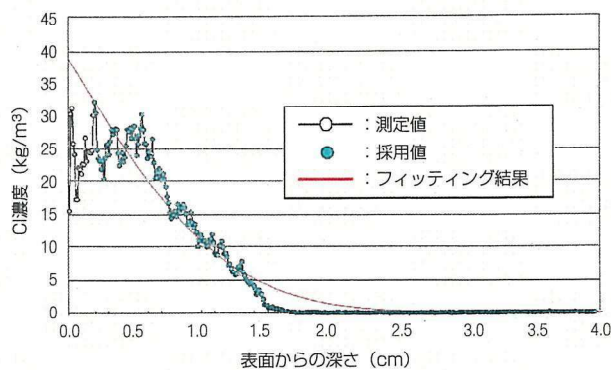


図-9 高炉セメントを用いたコンクリートのCl濃度分布

用い配合した塩分浸透履歴の試験結果を比較してみる<sup>5)</sup>。なお、高炉セメントを用いた場合の配合は、水セメント比が44%、スランプ8 cmで、設計基準強度は  $30 \text{ N/mm}^2$  である。

前述したEPMAによる0.498年間の浸漬結果の一例として、PCa壁高欄の塩分浸透履歴を図-3に示したが、高炉セメントを用いたコンクリートの塩分浸透履歴を図-9<sup>5)</sup>に示す。

図-3のPCa壁高欄コンクリートと図-9の高炉セメントを用いたコンクリートの0.498年間の浸漬結果による塩分浸透履歴を比較すると、両者のフィッティング結果に伴う浸透履歴勾配に差が見られるものの、コンクリート表面のCl濃度やコンクリート表面からの浸透深さはよく類似しており、この結果から、PCa壁高欄コンクリートにおける鋼材腐食発生限界濃度の計算は、高炉セメントB種相当を用いたコンクリートとして、式(5)より計算することとした。

$$C_{lim} = -2.6(W/C) + 3.1 (0.3 \leq W/C \leq 0.55) \quad (5)$$

ここに、 $C_{lim}$ : 鋼材腐食発生限界濃度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $W/C$ : 水セメント比

PCa壁高欄コンクリートの場合、水セメント比は、表-3より40%であるため、式(5)より、PCa壁高欄コンクリートにおける鋼材腐食発生限界濃度を計算すると、 $C_{lim} = 2.06 \text{ kg/m}^3$  となる。

##### (2) 本壁高欄のかぶりに対する耐久性評価

ここで、本壁高欄の耐久性を評価するためには、通常、壁高欄に用いられている場所打ちの普通コンクリートの100年耐久における塩害環境との比較が重要となる。そのため、普通コンクリートの耐久性評価で計算した100年耐久としての表面塩化物イオン濃度 ( $C_0 = 3.3 \text{ kg/m}^3$ ) を共通の指標としてPCa壁高欄コンクリートにも適用することとした。

そこで、図-7に示したPCa壁高欄の比較のための見掛けの拡散係数 ( $D_c = 0.130 \text{ cm}^2/\text{年}$ ) を基本として、この見掛けの拡散係数のばらつきを考慮し、また、既往の研究成果<sup>2)</sup>も参考にし、 $D_c = 0.150 \text{ m}^2/\text{年}$  の場合と  $D_c = 0.200 \text{ cm}^2/\text{年}$  の3水準について、コンクリートかぶり<sup>2)</sup>と耐久年数の関係をグラフ化した。

結果を図-10に示す。

図-10より、普通コンクリートのかぶり70 mmに対

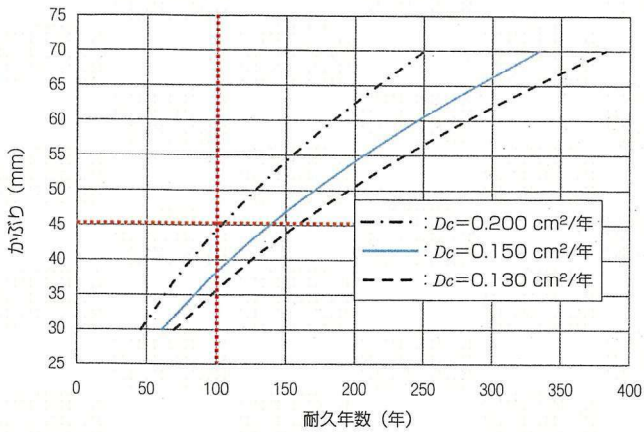


図-10 PCa壁高欄コンクリートの耐久性

して100年耐久となるコンクリート表面の塩化物イオン濃度 ( $C_0=3.3 \text{ kg/m}^3$ ) をPCa壁高欄コンクリートに適用した結果、PCa壁高欄コンクリートの見掛けの拡散係数を大きめ ( $D_c=0.200 \text{ cm}^2/\text{年}$ ) に考えても、かぶり45 mmを確保すれば100年耐久を確保でき、さらに、PCa壁高欄は、工場製作のプレキャストコンクリートであることを考えれば、鉄筋かぶりに対する施工誤差も小さく管理でき、密実なコンクリートが打設できること、ひび割れも入りづらいという品質向上の要因を加味すれば、場所打ちの普通コンクリートに比べ、遮塩性に対する耐久性は著しく向上すると考えられる。

## 5. ま と め

本報告では、凍結防止剤が散布される高速道路の環境において、普通ポルトランドセメントを用いた設計基準強度  $30 \text{ N/mm}^2$  のコンクリート壁高欄と早強ポルトランドセメントをベースとして高炉スラグ微粉末4000を30%混合した設計基準強度  $40 \text{ N/mm}^2$  のプレキャスト壁高欄に

ついて、「コンクリート標準示方書」に準じ、フィックの拡散方程式を用いて、コンクリートかぶりに対する100年耐久の検証を行った。

両者とも、100年耐久としてのコンクリート表面塩化物イオン濃度を統一するといった仮定を設けたが、結果として、早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末4000以上を30%以上混合したプレキャスト壁高欄では、100年耐久を考えた場合には、普通ポルトランドセメントを用いた壁高欄よりコンクリートかぶりを小さくできることが確認でき、少なくとも50 mm以上確保すればよいことが分かった。

コンクリートかぶりを小さくできれば、衝突荷重を受けける壁高欄にとって、構造的に有利となる。

最後に、本報告をまとめるにあたって、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いただきましたこと、誌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 (1989.9)
- 2) 与那嶺一秀, 山路 徹, 加藤絵万, 川端雄一郎: 長期海洋暴露試験および実構造物調査に基づくコンクリートの塩化物イオン拡散性状に関する検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1339 (2018.3)
- 3) 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, No. 3, pp. 268~275 (2010.7)
- 4) 青木圭一, 上平謙二, 神崎隆男, 田中嘉一, 高木絹華, 田村辰也: 急速施工と高耐久性を目指した新たなプレキャスト壁高欄の開発と衝突安全性について, 橋梁と基礎, pp. 45~61 (2013.3)
- 5) コンクリートの遮塩性試験報告書, (株) デイ・シイ 技術資料 (2013.5)
- 6) 丸屋 剛, 下村 匠, 石田哲也, 岩波充保, 長井宏平: 土木学会「2012制定コンクリート標準示方書〔設計編〕の塩害照査に関する改訂資料, コンクリート工学・テクニカルレポート, Vol. 52, No. 6, pp. 510~518 (2014.6)