論文　内的塩害を受ける既設鉄道 RC 高架橋の初期塩化物イオン濃度のばらつきと劣化予測に関する調査・研究

松橋　宏治[*1]・宇野　匡和[*1]・曽我部　正道[*2]・谷村　幸裕[*3]

要旨：本研究は，内的塩害を受ける RC 構造物の適切な維持管理手法を検討するため，既設鉄道 RC 高架橋の初期塩化物イオンのばらつきを詳細かつ広範に調査したものである。その結果，部位や柱毎，スラブ毎の部材による初期塩化物イオン濃度の変動係数は概ね 0.2 程度以下で，柱とスラブとの比較では 2 倍以上の差が生じる場合が見られた。さらに，連続する高架橋で柱を多数調査した結果，構造物による変動係数は 0.2～0.4 程度であった。また，モンテカルロ法を用いて劣化予測を行った結果，初期塩化物イオン濃度の変動係数が 0.0 の場合と比べ 0.2 では殆ど変化が無く，0.4 では加速期前期終了年の変動係数が 0.10 増加した。

キーワード：内的塩害，鉄道ラーメン高架橋，初期塩化物イオンのばらつき，劣化予測

1. はじめに

近年，塩害を対象として，実構造物の調査結果で得られた劣化要因のばらつきを考慮した劣化予測に基づく，構造物の LCC 評価に関する研究が盛んに行われている[1)]。しかし，これらの研究は何れも外部からの塩化物イオンの進入および拡散による鋼材腐食を対象としたものである。塩害にはその他に，除塩していない海砂を用いたこと等によりコンクリートの練り混ぜ時に供給された塩化物イオン（以下，初期塩化物イオン と言う）が原因となり鋼材腐食が生じる，いわゆる内的塩害があるが，このばらつきに着目した研究はこれまでほとんど行われていない。

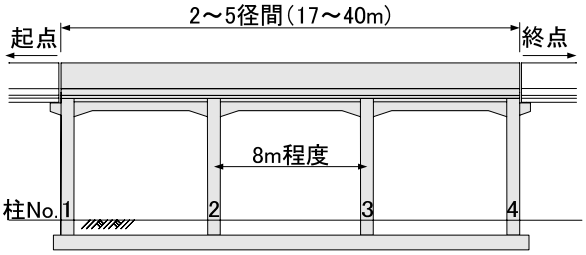
そこで本研究では，既設鉄道 RC 高架橋を対象に，初期塩化物イオン濃度を詳細かつ広範に調査し，得られた調査結果に対して部位，部材，構造物によるばらつき傾向について考察を行った。また，調査結果で得られた初期塩化物イオン濃度のばらつきに基づき，モンテカルロ法を用いて内的塩害および初期塩化物イオンと中性化による複合劣化（以下，複合劣化と言う）に関する劣化予測を行い，ばらつき程度が劣化予測の結果に及ぼす影響について検討した。

2. 構造物調査

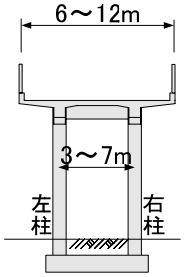
2.1 対象構造物

本研究では，鉄道構造物として最も一般的なビームスラブ式ラーメン高架橋のスラブおよび柱を対象とし，同様な調査を立地や建設年次の異なる A～C の 3 路線で実施した。**図-1** に代表的な高架橋の概略形状図を示す。

目視で確認した高架橋の変状は，路線 A では鋼材腐食によると考えられるひび割れが多数生



(a) 側面図



(b) 断面図（起点方から見た図）

図-1　対象構造物の概略形状

*1　(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 工修　(正会員)
*2　(財)鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部　構造力学　博(工) (正会員)
*3　(財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 博(工) (正会員)

じており，路線 B および C ではひび割れ（補修跡）等の変状が随所に生じていた。対象高架橋は何れも離岸距離が 1km 以上で飛来塩分の影響は受けないと考えられ，事前調査の結果より，変状原因は内的塩害と推定された。**表-1** に調査対象高架橋の経年および設計図書に示されたコンクリートの配合に関する設計条件を示す。

2.2 調査方法

塩化物イオン濃度の分析用試料には，ドリル削孔粉を用いた[2)]。試料は，塩化物イオンの拡散や中性化による濃縮等の影響を受けないと考えられる深さ位置（表面から 70mm～100mm）から，集塵装置付きドリル（ビット径φ20mm）を用いて採取した。得られた試料に対し，塩化物イオン電極を用いた電位差滴定法（JIS A1154）により全塩化物イオン濃度の分析を行った。また，詳細は省略するが，上記試料の採取箇所と同じ箇所に対し，中性化深さおよび鋼材のかぶり測定を実施した。

2.3 各部材の調査箇所

(1) 柱の調査

図-2 に柱に対する調査箇所を示す。詳細調査では，路線 B および C では柱上部（打継目直下 300mm 位置）と柱下部（地上 1200mm 位置）の 2 箇所，路線 A については柱の中間部も含めた 3 箇所の高さ位置から，1 箇所につき 2 試料ずつを採取した。また，簡易調査では，柱下部（地上 1200mm 位置）から 2 試料を採取した。

(2) スラブの調査

図-3 にスラブに対する調査箇所を示す。中間スラブ下面を対象に，詳細調査では 1 スラブにつき 6 試料を，簡易調査では 2 試料を採取した。

2.4 調査箇所数

表-2 に構造物調査の箇所数をまとめた。路線 A では，詳細調査および簡易調査を 3 ブロックの連続する高架橋に対し実施し，1 ブロックに対し柱の簡易調査を行った。また，路線 B および C では，詳細調査および簡易調査を高架橋 1 ブロックに対し実施し，柱の簡易調査を可能な限り連続して多数の高架橋に対し実施した。

表-1 高架橋の経年と設計仕様

路線	経年	コンクリートの設計仕様（設計図書より）		
		設計基準強度 f'_{ck}	最大水セメント比	粗骨材の最大寸法
A	27 年	27 N/mm^2	不明	25mm
B	27 年		55%	25mm
C	25 年		53%	20mm

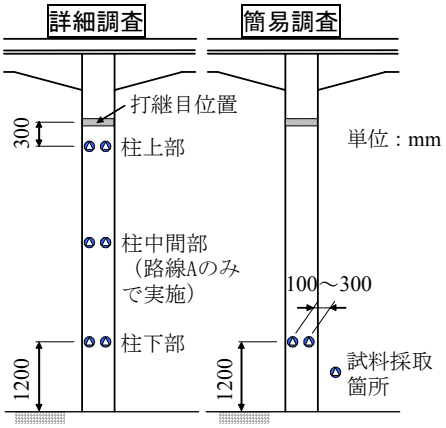
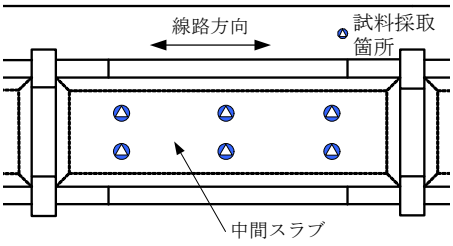
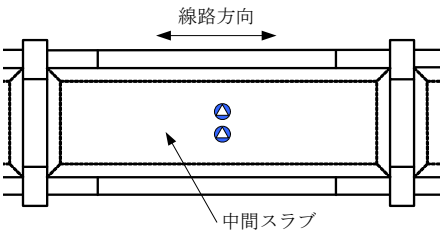


図-2 柱の調査箇所



(a)詳細調査（6 試料採取）



(b)簡易調査（2 試料採取）

図-3 スラブ下面の調査箇所

表-2 調査箇所数

			路線 A	路線 B	路線 C	合計
調査延長(m)			130	1300	1200	2630
高架橋数	詳細+簡易		3	1	1	5
	簡易(柱)		1	18	22	41
部材数	スラブ下面	詳細	3	2	1	6
		簡易	6	0	2	8
	柱	詳細	6	6	3	15
		簡易	9	18	27	54

3. 調査結果と初期塩化物イオンのばらつきに関する考察

3.1 柱の同一高さ位置におけるばらつき

柱に対しては，**図-2** に示すとおり同一の高さ位置から離隔 100～300mm 程度で近接して 2 つの試料を採取し，各々に対して分析を行った。**図-4** に，同一高さ位置 2 試料の塩化物イオン濃度の関係を，横軸に小さい方の測定値，縦軸に大きい方の測定値をとって示した。**図-4** より，両者には平均で 9%の差があるが，この差には採取位置による差異の他に，試料の採取法や分析法がもつ誤差[3)]が含まれると考えられる。以降に示す調査結果は上記の誤差を含むものであるが，これを超えるばらつきが見られる場合は，採取位置による差異の影響が顕著なばらつきと考えられる。

3.2 部位によるばらつき

詳細調査の結果に基づき，柱 1 本当り，および 1 スラブ当りの初期塩化物イオン濃度のばらつきについて整理する。**表-3** には柱 1 本当り，**表-4** には 1 スラブ当りの平均値，および標準偏差を平均値で除した変動係数を示している。同表において高架橋 No.と示す数字は，線路方向の順序に従っており，A1，A2･･･のように数字が連続する場合は高架橋が隣り合うことを示し，柱 No.およびスラブ No.とは**図-1** に示すように高架橋毎に起点方から順に付した番号である。

柱 1 本当りおよび 1 スラブ当りの初期塩化物イオン濃度の変動係数は，柱では**表-3** より 0.06～0.70（平均 0.19）で，スラブでは**表-4** より 0.08～0.15（平均 0.12）であった。また，C2-3 右柱および C2-3 左柱では 0.5～0.7 と非常に大きな変動係数となっており，本研究ではその原因は明らかにできなかったが，これを除いた柱の変動係数の平均値はスラブと同じく 0.12 であった。これらのことから，部位による初期塩化物イオン濃度のばらつきは変動係数で概ね 0.20 程度以下と考えられる。

3.3 部材によるばらつき

1 高架橋当りの部材によるばらつきについて

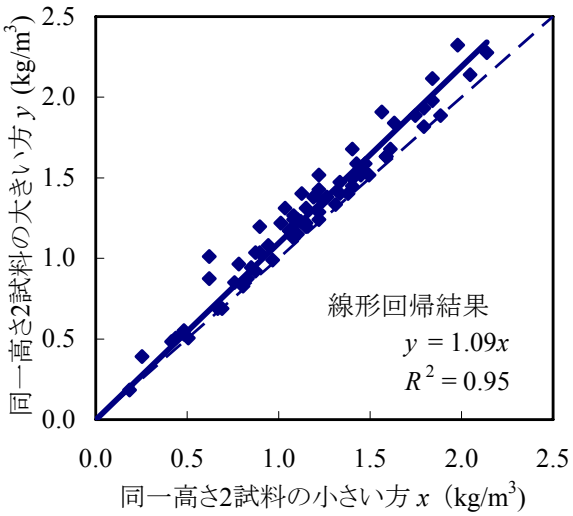


図-4 同一柱高さ位置から採取した 2 試料の塩化物イオン濃度の関係

表-3 柱の初期塩化物イオン濃度

高架橋 No.	柱 No.	試料数	柱 1 本当り		1 高架橋当り	
			平均値 (kg/m³)	変動係数	平均値 (kg/m³)	変動係数
A1	2 左	2	1.61	---	1.30	0.20
	3 左	2	1.12	---		
	4 左	2	1.17	---		
A2	2 左	2	0.45	---	0.49	0.09
	3 左	6	0.49	0.11		
	4 左	6	0.50	0.06		
	5 左	2	0.51	---		
A3	2 左	2	0.81	---	0.91	0.21
	3 左	6	1.05	0.22		
	4 左	6	0.80	0.12		
	5 左	2	0.90	---		
A4	1 左	6	1.21	0.16	1.19	0.15
	2 左	6	1.17	0.18		
	3 左	2	1.10	---		
	4 左	2	1.32	---		
B1	1 左	4	1.98	0.10	2.03	0.10
	2 左	4	1.91	0.07		
	3 左	4	1.94	0.08		
	1 右	4	2.23	0.11		
	2 右	4	2.21	0.08		
	3 右	4	1.88	0.04		
C2	1 右	2	0.95	---	0.61	0.56
	2 右	4	0.31	0.20		
	3 右	4	0.60	0.53		
	4 右	2	0.97	---		
	1 左	2	0.98	---		
	2 左	2	0.82	---		
	3 左	4	0.53	0.70		
	4 左	2	0.18	---		

整理する。**図-5** には，**表-3** および**表-4** に示す柱 1 本当り，1 スラブ当り，および 1 高架橋当りの平均値の分布について示した。

表-3 および**表-4** より，1 高架橋当りの変動係数は，柱では 0.10～0.56（平均 0.22）で，スラブでは 0.11～0.16（平均 0.15）で，1 スラブ当り，柱 1 本当りの変動係数とほぼ同等であった。柱 1 本当りの変動係数が大きかった C2 高架橋では，1 高架橋当りの変動係数も大きくなっているものの，柱毎，スラブ毎で比較した場合，部材によるばらつきは変動係数で概ね 0.20 程度以下と考えられる。

また，**図-5** より同一高架橋内における柱とスラブとでは，2 倍以上の差が生じている場合もある。柱とスラブとでは，同一高架橋でもコンクリートの打設時期が大きく異なるため，両者の間に一定の関係はないものと考えられる。

3.4 構造物によるばらつき

1 路線当りの構造物によるばらつきについて整理する。**表-5** には，柱の初期塩化物イオン濃度の 1 路線当りの平均値および変動係数を示した。また，**図-6** および**図-7** には，路線 B および路線 C における高架橋毎の柱の初期塩化物イオン濃度の線路方向分布を示し，図中に当該路線の工事誌や現地の状況から確実に判断できた工区境についても破線で示した。

表-5 より 1 路線当りの変動係数は 0.20～0.37 で，路線 A および路線 B では**表-3** に示す 1 高架橋当りの変動係数よりも大きく，構造物ごとのばらつきは，部位や部材によるばらつきよりもやや大きい傾向にあると考えられる。また，ばらつきはあるものの，**図-6** より路線 B では工区境より起点方では平均値を上回り，終点方では下回る傾向が見られ，路線 C では**図-7** より起点方では平均値を下回り，終点方では上回る傾向にある。工区境は**図-6** および**図-7** に示す以外にも存在すると思われるため，更に詳しい調査を要するが，構造物によるばらつきには使用材料の組成が施工者で異なることによる影響が含まれる可能性があると考えられる。

表- 4 スラブの初期塩化物イオン濃度

高架橋 No.	スラブ No.	試料数	1 スラブ当り 平均値 (kg/m^3)	1 スラブ当り 変動係数	1 高架橋当り 平均値 (kg/m^3)	1 高架橋当り 変動係数
A2	1	2	1.46	---	1.40	0.15
	2	2	1.24	---		
	3	6	1.39	0.14		
	4	2	1.61	---		
	5	2	1.30	---		
A3	1	2	1.23	---	1.09	0.11
	2	2	1.07	---		
	3	6	1.03	0.12		
	4	2	1.16	---		
	5	2	1.10	---		
A4	1	6	1.10	0.14	1.02	0.16
	2	2	1.10	---		
	3	2	0.89	---		
	4	2	0.85	---		
B1	1	6	1.18	0.15	1.33	0.16
	2	6	1.48	0.08		
C2	1	2	1.13	---	1.22	0.15
	2	7	1.29	0.12		
	3	2	1.08	---		

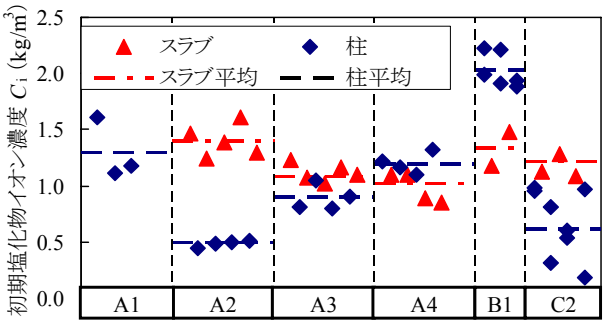


図- 5 部材および構造物毎の初期塩化物イオン濃度の分布

表- 5 柱の初期塩化物イオン濃度のまとめ

路線	高架橋数	平均値 (kg/m^3)	変動係数
A	4	0.97	0.37
B	19	1.47	0.20
C	23	1.20	0.33

4. 劣化予測の結果に及ぼす影響の検討

4.1 検討の概要

ここでは，初期塩化物イオン濃度のばらつき程度が，劣化予測の結果に及ぼす影響についてモンテカルロ法を用いて検討する。劣化予測モデルには，鉄道構造物等維持管理標準[4]に示されたモデルを用いた。モンテカルロ法では，各劣化要因の平均値および変動係数から正規分布を仮定して作成した 100,000 個の数値データに対

し，ランダムに 3,000 回の劣化予測計算を繰返した。予測モデルの詳細は後述するが，文献 4)では鋼材腐食発生の限界塩化物イオン濃度を 1.2kg/m^3 とし，初期塩化物イオン濃度がこれを超える場合は内的塩害の予測モデルを，0.6～1.2kg/m^3 の場合は中性化残りに応じて複合劣化または中性化の予測モデルとを使い分けることとしている。なお本予測モデルにおいて考慮する初期塩化物イオン濃度は，本研究で調査対象とした，中性化による濃縮等の影響を受けない部材深部の塩化物イオン濃度に基づいている。

4.2 劣化予測モデル

(1) 潜伏期

鋼材の腐食開始までの期間として定義される。各劣化予測モデルにおける，潜伏期終了時の閾値を以下に示す。

・中性化　：中性化残り 10 mm
・複合劣化：中性化残り 25 mm
・内的塩害：潜伏期なし

(2) 進展期

鋼材の腐食開始から腐食ひび割れ発生までの期間として定義される。各劣化予測モデルとも，進展期終了の閾値は，式(1)で算定される鋼材の腐食深さΔr_{cr}に達した時点とする。

$$\Delta r_{cr}=13(c/\phi)\times10^{-3}\ (\mathrm{mm}) \qquad (1)$$

また，各劣化予測モデルにおける鋼材の腐食速度 dr/dt は式(2)～(4)により算定する。

・中性化

$$\frac{dr}{dt}=3.0\times10^{-3} \qquad (2)$$

・複合劣化

$$\frac{dr}{dt}=\frac{10^{-3}}{\sqrt{c}}\left(19.34Cl^{-}+0.748W/C-49.4\right) \qquad (3)$$

ただし，$3.0\times10^{-3}\leqq dr/dt\leqq8.0\times10^{-3}$

・内的塩害

$$\frac{dr}{dt}=\frac{10^{-3}}{\sqrt{c}}\left(7.70Cl^{-}+0.503W/C-40.6\right) \qquad (4)$$

ただし，$1.0\times10^{-3}\leqq dr/dt\leqq8.0\times10^{-3}$

ここに，dr/dt：鋼材の腐食速度(mm/年)，c：かぶり(mm)，ϕ：鉄筋径(mm)，Cl^-：初期塩化物イオン濃度(kg/m^3)，W/C：水セメント比(%)

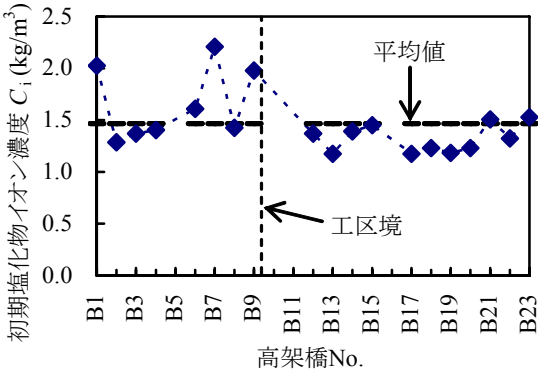


図-6 高架橋毎の柱の初期塩化物イオン濃度の線路方向分布（路線 B）

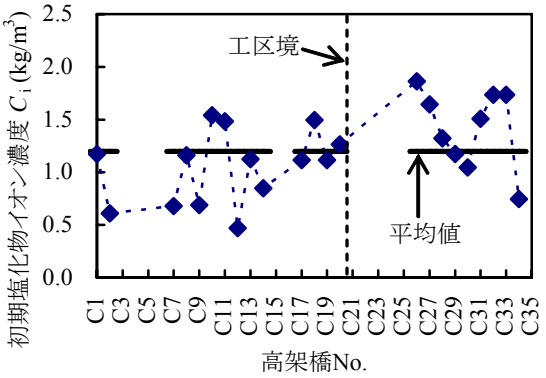


図-7 高架橋毎の柱の初期塩化物イオン濃度の線路方向分布（路線 C）

(3) 加速期前期

腐食ひび割れの発生からはく離，はく落発生までの期間と定義される。各劣化予測モデルとも，加速期前期終了の閾値は，式(5)で算定される鋼材の腐食深さΔr_{sp}に達した時点とする。

$$\Delta r_{sp}=56(c/\phi)\times10^{-3}\ (\mathrm{mm}) \qquad (5)$$

また，各劣化予測モデルにおける鋼材の腐食速度 dr/dt は式(2)～(4)により算定する。

4.3 劣化予測に用いるパラメータ

本検討で用いた劣化予測の各種パラメータを**表-6** に示す。これらは路線 C に対する柱の簡易調査結果に基づき設定した。ただし，初期塩化物イオン濃度の変動係数は，その影響を検討するために 0.0～0.4 の範囲で 3 ケースを設定した。

4.4 劣化予測の結果

表-6 に示す条件によりモンテカルロ法を用いて加速期前期が終了する経年を算定した。**図-8**

には累積確率の経年変化を，**表-7** には平均値，標準偏差および変動係数について示した。**図-8** より，初期塩化物イオン濃度の変動係数が大きい程，加速期前期が早期に終了する確率が大きいが，その影響程度は，**表-7** より変動係数が 0.0 の場合と比べて 0.2 では殆ど変化が無かったが，0.4 では加速期前期終了年の変動係数が 0.10 増加した。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

(1) 柱の同一高さ 2 試料の，初期塩化物イオン濃度の誤差は平均で 9%であった。これには，採取位置による差異の他に，試料採取や分析法がもつ誤差が含まれると考えられる。

(2) 初期塩化物イオン濃度の部位によるばらつきは，柱およびスラブともに変動係数で概ね 0.20 程度以下であった。

(3) 柱毎，スラブ毎で比較した場合，初期塩化物イオン濃度の部材によるばらつきは，部位による場合と同程度で，変動係数は概ね 0.20 程度以下であった。ただし，柱とスラブとの比較では，2 倍以上の差が生じる場合も見られた。柱とスラブとではコンクリートの打設時期が大きく異なるため，両者の間に一定の関係はないものと考えられる。

(4) 多数の高架橋で連続的に柱を調査した結果，構造物による初期塩化物イオン濃度のばらつきは変動係数で 0.20～0.37 で，部位や部材によるばらつきよりもやや大きい傾向であった。また，線路方向の分布から，構造物によるばらつきには使用材料の組成が施工者で異なることによる影響が含まれる可能性があると考えられる。

(5) 劣化予測にモンテカルロ法を用いて行った結果，初期塩化物イオン濃度の変動係数が 0.0 の場合に比べて 0.2 の場合は殆ど変化が無かったが，0.4 の場合に加速期前期が終了する経年の変動係数が 0.10 増加した。

表-6 劣化予測に用いるパラメータ

	平均値	変動係数 *Cv*
初期塩化物イオン濃度 Cl^- (kg/m^3)	1.2	0.0 , 0.2 , 0.4
中性化速度係数 α (mm/√年)	1.9	0.38
かぶり *c* (mm)	28.8	0.22
水セメント比 *W/C*	53%	---
鉄筋径 φ	D13	---

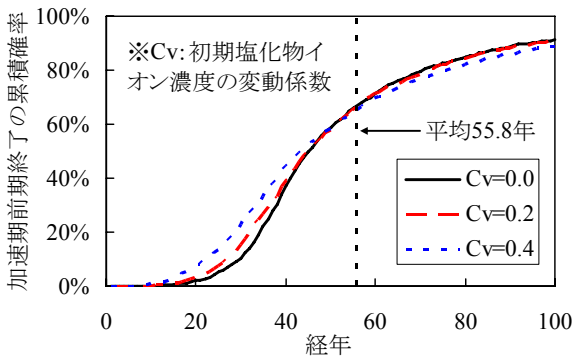


図-8 加速期前期終了の累積確率

表-7 加速期前期終了年の算定結果に及ぼす初期塩化物イオン濃度 Cl^- の変動係数の影響

かぶりの変動係数	Cl^- の変動係数	加速期前期終了年		
		平均	標準偏差	変動係数
0.22	0.0	53.8 年	31.1 年	0.56
	0.2		31.7 年	0.57
	0.4		36.6 年	0.66

参考文献

1) 伊庭孝充ほか : 塩害を受ける RC 構造物のライフサイクルコスト算定手法に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.704／V-55，pp.1-11，2002.5

2) 湯浅昇ほか : ドリル削孔粉を用いたコンクリート中の塩化物イオン量の現場試験方法の提案，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.1303-1308，1999.6

3) 松浦誠司ほか : ドリル粉末を用いた塩化物イオン量測定の精度，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.2031-2036，2004

4) 鉄道総合技術研究所 : 鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物，pp.222-231，2007.1