

◆ 報 文 ◆

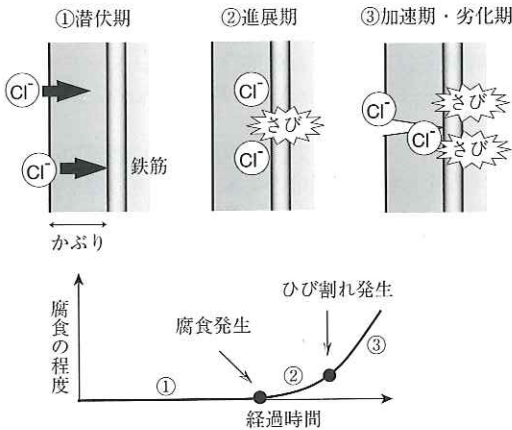
コンクリート中の塩化物イオン濃度分布簡易分析シートを用いた 塩害劣化予測の実用性検証

古賀裕久 * 河野広隆 **

1. はじめに

海岸線近くなど塩分が飛来する環境にあるコンクリート構造物では、構造物の表面から侵入した塩化物イオンの影響でコンクリート中の鋼材が腐食する『塩害』が生じるおそれがある。塩害は、図-1のように、①コンクリート中への塩化物イオンの侵入、②鋼材の腐食開始、③腐食に伴う鉄筋の膨張によるコンクリートのひび割れ、の順に進行する。コンクリートにひび割れが生じた後は、水や酸素、塩化物イオンなど鋼材の腐食を加速させる劣化要因がさらに容易に鋼材周辺まで侵入するようになり、劣化が急速に進行するので注意が必要である。

しかし、目視による調査では、コンクリート表面にひび割れ等の変状が生じるまで、塩害による劣化の徴候を捉えることができない。したがって、



- ①潜伏期：
かぶりコンクリートへの塩分の飛来・侵入
- ②進展期：
塩化物イオン濃度が一定以上になると、鋼材表面の不動態皮膜が破壊され、腐食が始まる。
- ③加速期・劣化期
腐食による鋼材の膨張でひび割れが発生すると、劣化因子の侵入速度が飛躍的に大きくなり、急速に劣化

図-1 塩岸のメカニズム

塩害を受けるおそれがある構造物については、コンクリート中に含まれる塩化物イオン濃度の分布を調査し、それをもとに塩化物イオンの侵入に関する将来予測を行って、鋼材の腐食が生じる前に対策を行うことが重要であると考えられる。そこで、国土交通省では、塩害のおそれがある橋梁の定期点検時に、塩化物イオン濃度分布の調査および将来予測を行う塩害特定点検（仮称）を近く導入する予定である。

外部からコンクリートに侵入する塩化物イオンの量については、フィックの拡散法則から予測できることが、近年の研究から明らかになっている。すなわち、コンクリート中の塩化物イオン濃度の分布は、周辺環境の厳しさに関連した「表面塩化物イオン量」とコンクリートの品質に関連した「見掛けの拡散係数」、骨材など使用された材料中に当初から含まれていた「初期塩化物イオン量」の3つのパラメータが定めれば、式-1として与えられる。土木学会のコンクリート標準示方書[施工編]でも、平成11年版以降、フィックの拡散法則を用いた耐久性設計の方法が示されている¹⁾。なお、各パラメータの意味については図-2に詳細を示す。

$$C(x, t) = C_0 \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) + C_i \quad \dots (1)$$

ここに、 $C(x, t)$: コンクリート表面からの距離が x cm、
施行竣工後の経過年数が t 年のときの
塩化物イオン量 (kg/m^3)

C_0 : 表面塩化物イオン量 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

C_i : 初期塩化物イオン量 (kg/m^3)

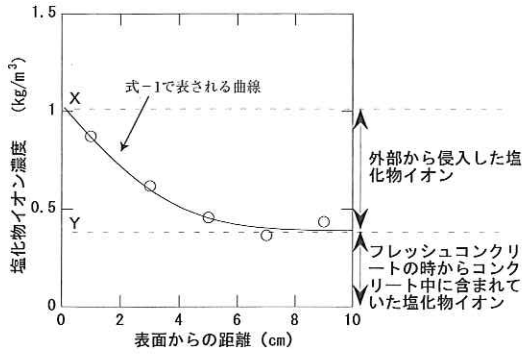
x : コンクリート表面からの距離 (cm)

t : 竣工後の経過年数

$\text{erf}()$: 誤差関数(式-2)

$$\text{erf}(s) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta \quad \dots (2)$$

A Study on Future Salt Distribution in Concrete Predicted by the Method on PWRI HP



- ※表面塩化物イオン量：構造物のごく表面部に一するコンクリートに含まれている塩化物イオンの濃度を表す係数、 X の値から Y の値を減じた値に対応
- ※見掛けの拡散係数：塩化物イオンが、拡散現象によりコンクリート表面から内部に移動する際の速度を表す係数、推定曲線の形状（傾きの大きさ）に影響、ただし、推定曲線の形状は他のパラメータにも影響されるので、上のグラフの形状から見掛けの拡散係数を直感的に求めることは不可能
- ※初期塩化物イオン量：コンクリート中に（使用材料の一部として）当初から含まれていたと考えられる塩化物イオンの量を表す係数、 Y の値に対応

図-2 塩化物イオン濃度分布の分析の際に推定するパラメータの詳細

既存構造物のコンクリート中に侵入する塩化物イオン濃度についても、式-1を用いて将来の塩化物イオン濃度分布を予測することができる。すなわち、①コンクリート表面からの距離が異なる複数点で塩化物イオン濃度の測定を行い、②実測値と式-1で与えられる曲線が良く合致するように、表面塩化物イオン量・見掛けの拡散係数・初期塩化物イオン量の3つのパラメータを定め、③任意の時点における塩化物イオン濃度分布を算出すればよい。

しかしながら、式-1は誤差関数を含み、形状が複雑なので、実測値と式-1をフィッティングさせ、表面塩化物イオン量・見掛けの拡散係数・初期塩化物イオン量を推定する計算を行うのは容易ではなく、計算のための適切なプログラムを作成する必要がある。このため、フィックの拡散係数を用いて塩化物イオン濃度の将来予測を行うことは、まだ一般的には行われていないのが現状である。

そこで、塩害特定点検結果を活用したコンクリート橋の維持管理を支援するツールとして、一般的に用いられている表計算ソフトで簡易に

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 ◎ 独立行政法人土木研究所

試料採取位置 (mm)	塩化物イオン濃度実測値 (kg/m³)		採否	塩化物イオン濃度計算値 (kg/m³)	誤差	塩化物イオン濃度 (kg/m³)				
	開始深さ	終了深さ				実測値	計算値 <現時点>	推定値 <将来>		
データ1	0	20	2.15	1	2.179	0.019	10	2.15	2.18	2.50
データ2	20	40	1.20	1	1.195	-0.001	30	1.20	1.20	2.02
データ3	40	60	0.28	0	0.563		50	0.28	0.56	1.58
データ4	60	80	0.23	1	0.261	0.133	70	0.23	0.26	1.20
データ5	80	100	0.16	1	0.155	-0.036	90	0.16	0.16	0.88
データ6										
データ7										
データ8										
データ9										
データ10										

竣工年	1985
調査年	1998
将来推定年	2083

表面塩化物イオン量 C_0 (kg/m³)	2.63
見掛けの拡散係数 D_0 (cm²/年)	0.46
初期塩化物イオン量 C_1 (kg/m³)	0.12

経過時間1 (秒)	4.4E+08
経過時間2 (秒)	2.5E+09
拡散係数単位変換 D_0 (cm²/秒)	1.46E-08

【推定結果のチェックポイント】
 ①表面塩化物イオン濃度は0.3~20kg/m³程度の範囲にある。
 ②見掛けの拡散係数が0.05~2cm²/年程度の範囲にある。

ここにデータを
入力

➔

推定値を
入力・修正

➔

実測値と
計算値の
比較

塩化物イオン濃度計算値 (kg/m³)	誤差
2.179	0.019
1.195	-0.001
0.563	
0.261	0.133
0.155	-0.036
誤差の平均 0.064	

深さ (mm)	塩化物イオン濃度 (kg/m³)		
	実測値	計算値 <現時点>	推定値 <将来>
10	2.15	2.18	2.50
30	1.20	1.20	2.02
50	0.28	0.56	1.58
70	0.23	0.26	1.20
90	0.16	0.16	0.88

将来の
塩分濃度分布
推定結果

計算値と実測値の比較

図-3 分析シート

フィックの拡散法則に基づく塩化物イオン濃度分布の分析ができる「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」(以下、分析シート)を作成した(図-3)。

ただし、実構造物中の塩化物イオン濃度分布は種々の影響を受け、必ずしもフィックの拡散法則で予測される通りになるとは限らない。分析シートを用いた分析においても、データの採否などは分析を行う技術者が判断する必要があり、誰が行っても同じ結果が得られるというわけではない。

そこで、分析シートを用いた将来予測の個人差を検証するため、複数の技術者が塩化物イオン濃度分布の分析を行った結果を比較した。本報では、その結果を報告する。

2. 分析シートを用いた将来予測の手順

分析シートを用いた将来予測は、①塩化物イオン量の測定値など実構造物の調査データの入力、②各種パラメータの推定・入力、③塩化物イオン量の実測値とフィックの拡散法則から求められる計算値の比較・各種パラメータの修正、④セルに出力される将来予測結果等の記録、の手順で行う。

実構造物の塩化物イオン濃度分布は、供用期間中の周辺環境やコンクリートの品質が必ずしも一定ではない等のため、必ずしもフィックの拡散係数から推定される曲線と一致するとは限らない。そこで、分析作業では、データの取捨選択などの判断が適切に行われることが重要である。しかし、塩化物イオン濃度の絶対値や濃度分布の形状は、

構造物によって様々であり、機械的にデータの採否や各種パラメータの推定を行うことは困難である。したがって、分析シートを用いた分析では、技術者が、推定値を微修正しながら分析を行わなければならない。

3. 分析結果の個人差に関する検討

3.1 検討の目的

前章で述べたように、塩化物イオン濃度分布の分析は、技術者が測定データを解釈しながら行う必要があり、将来の塩化物イオン濃度分布の予測値が分析者によって異なる可能性がある。そこで、分析者の違いが分析シートを用いた将来推定の結果に与える影響を検討した。

3.2 検討方法

4名の技術者(コンクリート技士、コンクリート診断士などの資格取得者)に、分析シートと使用方法に関する簡単な説明書を渡し、実構造物の塩化物イオン濃度分布の実測値から、表面塩化物イオン量・見掛けの拡散係数・初期塩化物イオン量の3つのパラメータを推定させた。データの取捨選択や実測値と計算値のフィッティングの良否の判断は、各技術者が行った。なお、分析対象の事例は、著者が有する100件以上の調査結果から、典型的なものを選定した。

4名の技術者(B~E)の分析結果を、分析シートを作成した技術者(A)による分析結果と比較した。なお、技術者Aは、本報で紹介する事例について詳細な調査結果を有し、かつ、他の

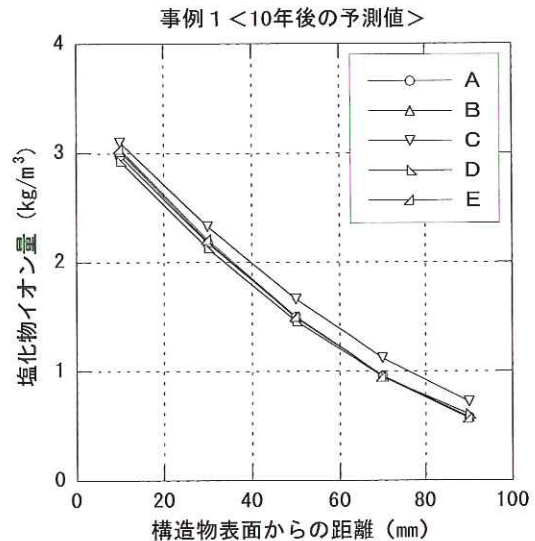
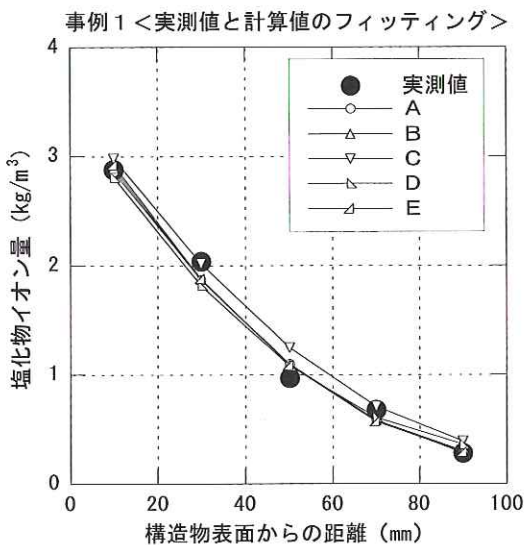


図-4 事例1の分析結果

プログラムを用いた分析も実施しているので、妥当な推定を行っているものと考えてよい。

3.3 検討結果と考察

(1) 事例1 (竣工後15年、橋台)

事例1は、塩化物イオン濃度の測定結果の全てがフィックの拡散法則から予測される曲線上に集まっており、分析が比較的容易な事例である。分析結果を図-4に示す。

事例1の分析結果には、技術者による推定結果の違いは少ない。技術者Cによる推定曲線が他の4名のものより、塩化物イオン量がやや高く

(図-4左側)、この傾向は10年後の塩分分布の推定結果(図-4右側)にも継承されている。ただし、事例1のように塩化物イオン量の実測値とフィックの拡散法則による計算値の整合性が非常に高い場合でも、個々の実測値と計算値には若干の開きがあるので、技術者Cと他の4名との差は、十分に小さいと考えてよい。

(2) 事例2 (竣工後14年、橋台)

事例2は、コンクリートの中性化により表面から20mmまでの位置で塩化物イオン濃度が減少していると思われる事例である。中性化深さは

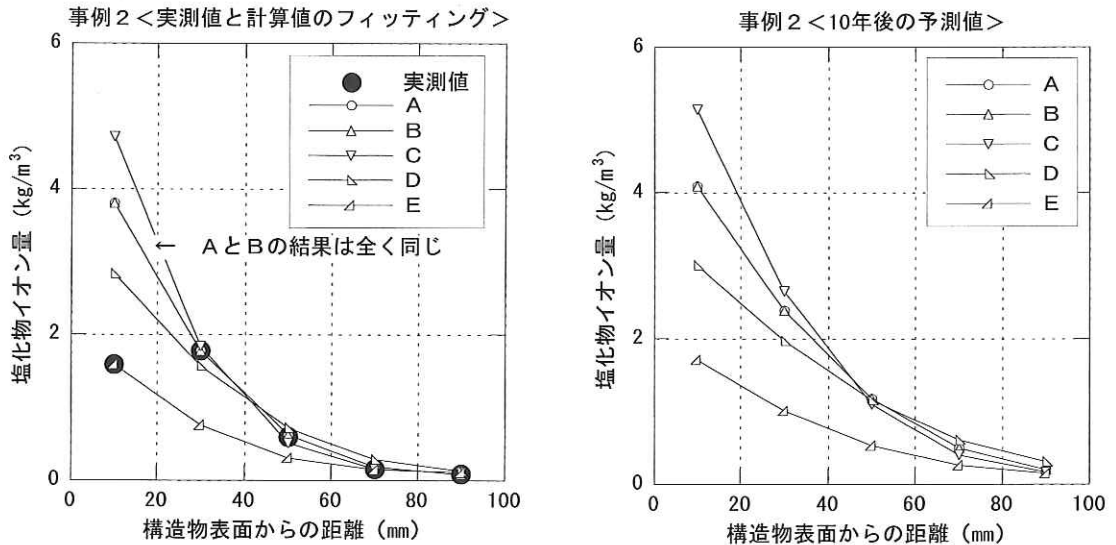


図-5 事例2の分析結果

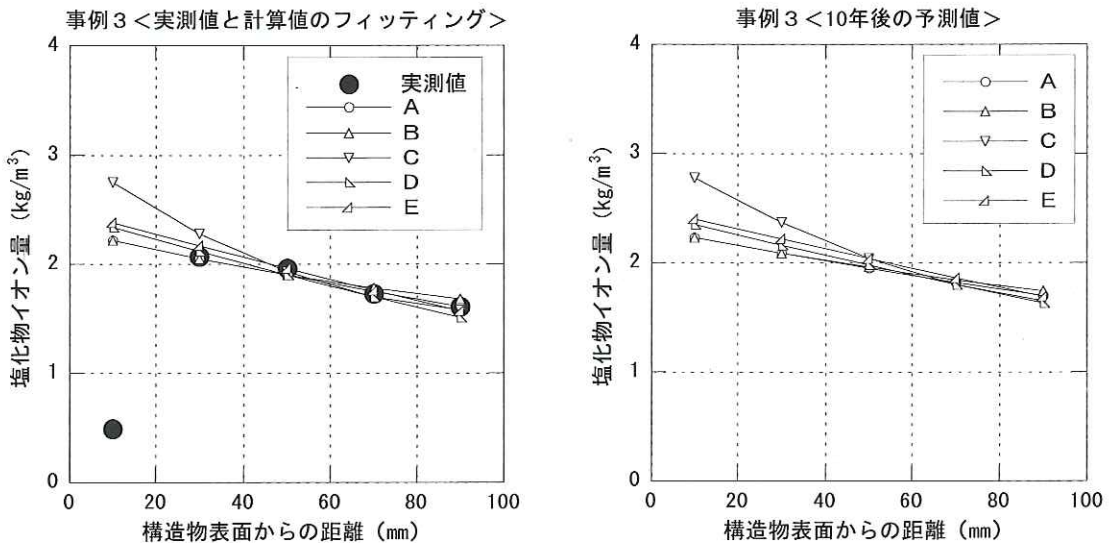


図-6 事例3の分析結果

10mm 程度以下であり、表面から 20mm 以上の 4 つのデータには中性化の影響はほとんどないものと考えられる。分析結果を図-5 に示す。なお、中性化深さは、分析を行った測定者 B ~ E には明らかにされていない。

事例 2 における技術者 E の分析結果は、中性化の影響を受けて塩化物イオン濃度が低下したデータにあわせるようにフィッティングを行っているので、明らかな誤りである。この結果、技術者 E の分析結果に基づいた将来の塩化物イオン濃度分布は、他の 4 名のものと大きく異なっている。

一方、技術者 A ~ D の分析結果には、 $C > A$ 、 $B > D$ の順に傾きが大きくなっており、表面塩化物イオン量の推定値には大きな差がある。また、塩化物イオン濃度分布の将来予測を見ると、このフィッティングの差により、コンクリート表面から 40mm までの位置における予測値は大きく異なっている。しかし、コンクリート表面からの距離が 40mm 以上の位置では、技術者 A ~ D の差は大きくないので、鉄筋のかぶり厚が 40mm 以上の場合には、推定結果の個人差は問題にならないと考えられる。

(3) 事例 3 (竣工後 27 年、樋門)

事例 3 は、コンクリート中に建設当初から多量の塩化物イオンが含まれていたと考えられる事例である。分析結果を図-6 に示す。また、技術者による分析結果の違いをより明確にするため、表面から 200mm の距離まで推定結果を外挿した結果を図-7 に示す。

初期塩化物イオン量の推定結果については、 0.2kg/m^3 (技術者 E) ~ 1.5kg/m^3 (技術者 C) と大きな差があり、推定された見掛けの拡散係数にも $0.4\text{cm}^2/\text{年}$ (技術者 C) ~ $5.4\text{cm}^2/\text{年}$ (技術者 E) と大きな差があった。これらの中間的な値を予測した技術者 A、B、D の分析結果がコンクリートの拡散係数等として一般的な値であるが、今回の分析範囲のうち構造物表面からの距離が 40 ~ 100mm の範囲では、いずれの分析結果を用いても、推定結果の個人差は問題にならないと考えられる。

事例 3 <実測値と計算値のフィッティング>

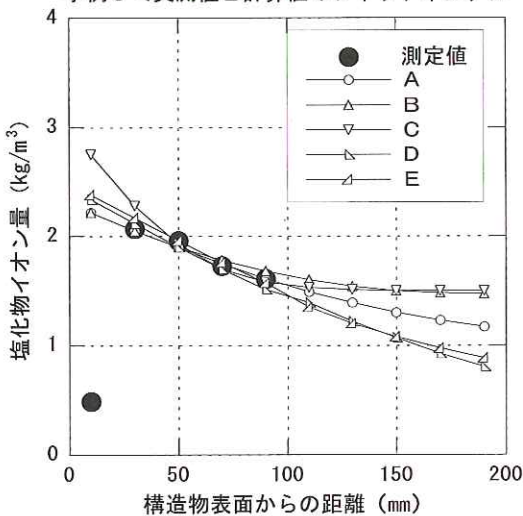
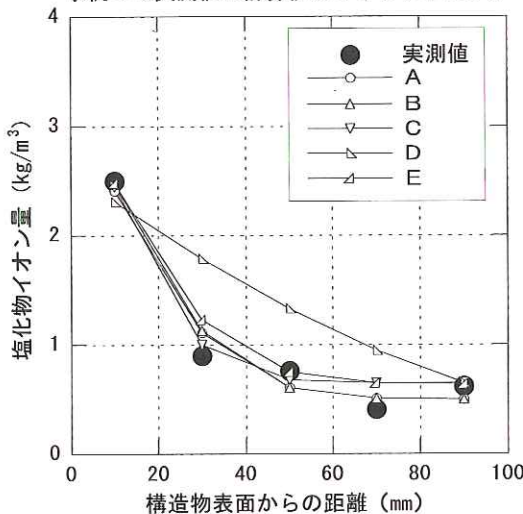


図-7 事例 3 の推定結果を外挿した場合

事例 4 <実測値と計算値のフィッティング>



事例 4 <10年後の予測値>

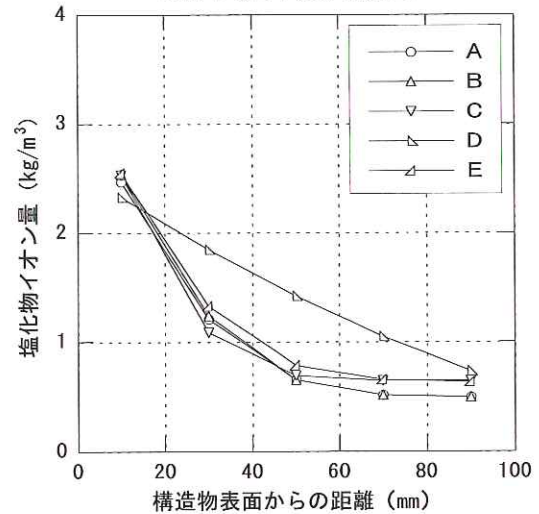


図-8 事例 4 の分析結果

一方、造物表面からの距離が100mmを超える位置まで推定結果を外挿すると、各パラメータの推定結果の違いにより、各技術者の推定結果に大きな違いが見られた。したがって、塩化物イオンの測定値に良く合致するような推定を行うことが出来た場合でも、推定結果を実測データの範囲外に外挿する場合には、注意する必要がある。

(4) 事例4 (竣工後56年、橋台)

事例4は、構造物表面からの距離が40～100mmの範囲にある3点のデータがジグザク状に分布しており、フィッティングが難しい事例である。フィックの拡散法則から予想される曲線がこの3点全てを通過することは不可能である。分析結果を図-8に示す。

適当な曲線を見いだせなかった技術者Dを除くと、他の4者の分析結果には次の特徴がある。技術者AおよびBは、40～100mmの値でほぼ同等の塩化物イオン量が測定されていることから、その平均的な値を初期塩化物イオン量としている。これに対し、技術者CおよびEは、最も構造物表面から遠い測定点での測定結果をもとに初期塩化物イオン量を推定している。

技術者A～C、およびEのいずれの分析結果でも塩化物イオン濃度の分布には大差がないが、ここで60～80mmおよび80～100mmの2点の測定点についてどちらかのデータを重視する合理的な理由はないので、この場合は、技術者A、Bのように平均的な値にフィッティングさせるのが妥当であると考ええる。

4. 検討結果のまとめ

本報で紹介した以外にも数件の実構造物調査結果を用いて検討を行い、分析シートを用いた将来推定の個人差について、以下の知見が得られた。

- ①中性化を受けたコンクリートでは、データの取舍選択に注意する必要がある。中性化領域の測定データは、実測値と計算値のフィッティングの際に排除して考えなければならない。
- ②コンクリートの表面から遠い位置でデータがばらついた場合は、初期塩化物イオン量の推定に注意する必要がある。具体的には、初期塩化物イオン量として、コンクリートの表面から最も遠い位置の測定結果を用いるのではなく、数点の測定結果の平均値を用いる方が妥当な場合があるので、これを検討しなければならない。
- ③①②に留意して分析を行うと、将来予測結果(10年程度)の個人差は小さく、特にコンク

リート表面から40mm以上の位置については、考慮する必要はない。

- ④①②に留意して分析を行っても、事例3のように、個々のパラメータの推定結果に大きな個人差が生じる場合がある。このため、分析結果を実測データの範囲外に外挿する場合には、その妥当性を十分に検討する必要がある。

これらの知見を元に、分析シートのマニュアルおよび付属資料を作成し、分析の際に留意すべき点として明確にした。

5. おわりに

フィックの拡散法則を用いてコンクリート中の塩化物イオン濃度分布の将来予測を行う際に使用できる「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」を作成し、これを用いた分析の個人差について検討した。

分析シートを用いることで、複雑な計算を要せずとも、外部からの塩化物イオンの侵入について将来予測を行うことができる。活用法としては、現に構造物中に含まれている塩化物イオンの量や竣工年代が異なる複数の構造物について将来予測を行い、近い将来に鉄筋の腐食が生じる可能性が高い構造物から優先的に補修等の検討を行う、といったことが考えられる。

なお、分析シートは、誰でも利用できるように、土木研究所のホームページ (http://www.pwri.go.jp/jpn/tech_inf/download.htm) で公開していますので、是非、ご活用ください。

参考文献

- 1) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，pp.24-28，2002年3月

古賀裕久*



独立行政法人土木研究所
技術推進本部構造物マネ
ジメント技術チーム研究員
Hirohisa KOGA

河野広隆**



独立行政法人土木研究所
技術推進本部構造物マネ
ジメント技術チーム主席
研究員
Hirotaka KAWANO