

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 使用マニュアル

目次

1. 概要
 2. 適用範囲
 3. 使用方法
 4. 著作権等
- 付録1. 塩化物イオン濃度の分析例
- 付録2. Q & A集

1. 概要

この「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)は、コンクリート表面から深さ方向に複数の試料を採取して行った、硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験結果を分析し、**構造物の外部からもたらされる塩分が構造物の内部に侵入する場合の、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等**を推定するためのテンプレート(マイクロソフト社のExcel2000形式で作成しています)です。

この分析シートを用いることで、以下のことができます。

- 1) フィックの拡散式に基づく曲線を引き、塩化物イオン量の測定結果と比較することができます。
- 2) 1)の機能を利用して、調査箇所における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ことができます。
- 3) 推定した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用いて将来の塩化物イオン濃度の分布を推定することができます。

2. 適用範囲

この分析シートでは、以下の条件に合致したデータを分析できます。

- 1) データの数は、10個まで。
- 2) 試料の採取位置は、コンクリート表面からの距離で200mm以内。

3. 使用方法

この分析シートを用いて、コンクリートの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場合には、次の1)～5)の手順に従って行ってください。

1) 採取したコアの塩分量分析結果等を整理し、以下のデータを入力します(薄い黄色のセル、いずれも必須)。使用するデータが10個以下の場合、残りは空欄とします。

- ・ 試料採取位置：分析した試料のコンクリート表面からの距離を記入します。
- ・ 塩化物イオン濃度実測値：測定された塩化物イオン濃度を記入します(単位は kg/m³)。
- ・ 竣工年：構造物の竣工年を西暦で記入します。
- ・ 調査年：調査を行った年を西暦で記入します。

2) 塩化物イオン濃度の実測値の分布を元に、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を推定し記入します。また、将来推定年を決定し記入します(オレンジ色のセル、いずれも必須)。以下の順に記入するのが、比較的容易です。

- ・ 初期塩化物イオン量：測定塩化物イオン量の分布を見て、適当と思われる値を記入します。
- ・ 表面塩化物イオン量：通常、測定塩化物イオン量の最大値よりもやや高い値を記入します。
- ・ 見掛けの拡散係数：通常、0.5～5程度の値を記入します。
- ・ 将来推定年：調査年以降の任意の年を西暦で記入します。

3) グラフ「計算値と実測値の比較」を見て、計算値と実測値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に記入した数値を修正します。計算値と実測値の差は、誤差の平均(セルI17)としても示されますので参考にしてください。

※コンクリートが中性化すると、中性化した領域に含まれていた塩分が内部の未中性化領域に移動するなど、塩分の濃度分布に影響があることがわかっています。したがって、コンクリートが中性化している部分での実測値と計算値が合致する必要はありません。

※実測値の中に明らかに異常値であると判断できるデータが含まれる場合には、採否の欄(セルF6～F15)に0を入力します(通常は1, 1または0とする)。採否の欄に0が入力されたデータは、誤差の平均の算出に反映されません。

※データの個数に合わせてグラフのデータ範囲を変更してください(配布時のファイルでは、測定データが5点の場合を想定しており、測定データがこれより多いまたは少ない場合にはグラフの表示が不自然なものになります)。

4) 推定結果が、適切なものであるかどうかチェックします。これまでの実構造物の調査結果等によると、表面塩化物イオン量、見掛けの拡散係数は、おおむね以下の範囲にあることがわかっています。これらの値と大きく異なる結果が得られた場合には、データの入力等に誤りがないか、塩分が外部から侵入していると考えるのが適切か、再度、確認してください。

※表面塩化物イオン量の範囲：通常，0.3～20kg/m³程度

※見掛けの拡散係数の範囲：通常，0.05～2cm²/年程度

5) セルK4～N15の範囲に、コンクリート表面からの距離、塩化物イオン量(実測値，入力した拡散係数等に基づく計算値，将来の推定値)が表示されます。

4. 著作権等

- ・この分析シートの著作権は、独立行政法人土木研究所が有します。
- ・この分析シートは、どなたでも無料で使用することができます。ただし、この分析シートの使用に起因するいかなる事態にも独立行政法人土木研究所は責任を負わないものとします。
- ・この分析シートは、内容の改変等が無くかつ無償で行う場合に限り、自由に配布することができます。

<連絡先>

この分析シートに関するお問い合わせは、以下にお願いします。

※お問い合わせの前に、付属資料のQ&A集をご覧ください。

〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6

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

TEL：029-879-6761

付録1. 塩化物イオン濃度の分析例

実際の塩化物イオン試験結果について、分析シートを用いて実構造物の塩化物イオン濃度分布を分析した例(分析の流れ)を示します。

測定データ等の入力

コンクリート表面から100mmまでのコアを採取し、5等分して、硬化コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験(全塩化物イオン)を実施した。その結果、表面から順に2.15kg/m³、1.20kg/m³、0.28kg/m³、0.23kg/m³、0.16kg/m³、という試験結果を得た。

この場合、コアを5等分しているのので、表面に最も近いコアの試料採取位置は0～20mmである。そこで、セルC6に0を、D6に20を記入した。また、セルE7には分析結果である2.151を記入した。以下順にC7～E10についても記入した。セルC11～E15については、該当するデータがないので記入しない。

竣工年、調査年を記載する。この試料の場合は、竣工年が1985年、調査年が1999年であったので、これをセルC17、C18に記入した。

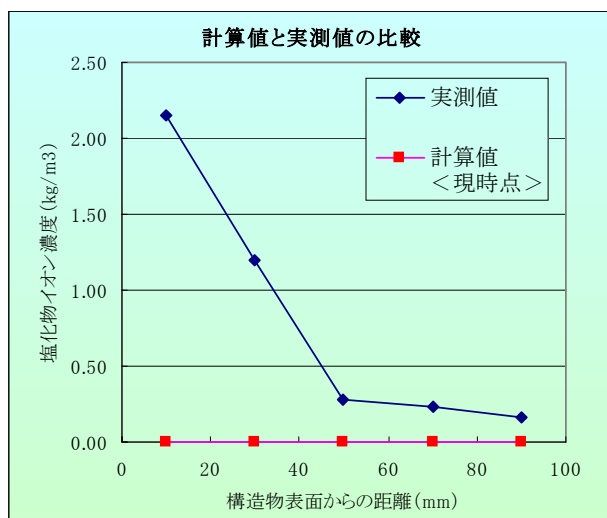
ここでは、調査から10年後の2009年の塩分分布も推定することにした。そこで、セルC19に2009と記入した。

この状態でシート右下に表示されるグラフは、付図-1.1の通り。

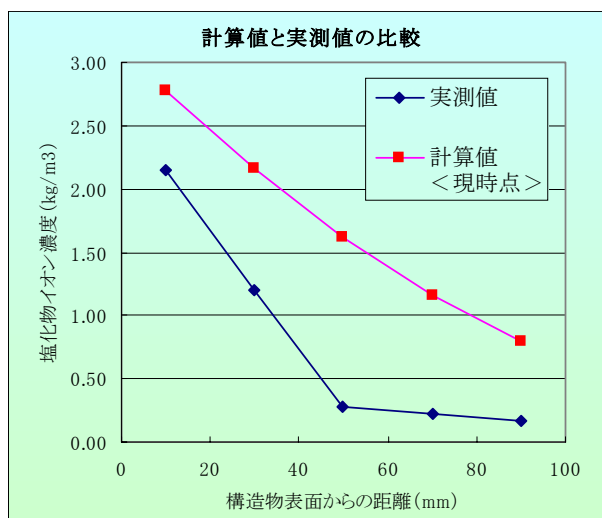
推定値等の入力

構造物表面からの距離が40～100mmの範囲にある3つのデータの並び方から、初期塩化物イオン量は0.10kg/m³程度と推定し、これを入力した。次に、表面塩化物イオン量、見掛けの拡散係数をそれぞれ、3.00kg/m³、2.0cm²/年と推定し、入力した。

この状態でシート右下に表示されるグラフは、付図-1.2の通り。



付図-1.1 入力後のグラフ表示(その1)



付図-1.2 入力後のグラフ表示(その2)

推定値の修正

付図-1.2のグラフを見ると、計算値の曲線の傾きは実測値の傾きよりもやや小さい、したがって、見掛けの拡散係数をより小さい方向に修正する。また、計算値は実測値よりも全体的に大きいので、表面塩化物イオン量を小さい方向に修正する。

上記の2つのパラメータを変化させながら修正を繰り返した結果、表面塩化物イオン量、見掛けの拡散係数をそれぞれ、 2.60kg/m^3 、 $0.4\text{cm}^2/\text{年}$ とすると、2つの曲線が比較的良く合致することが明らかになった。

この状態でシート右下に表示されるグラフは、付図-1.3の通り。

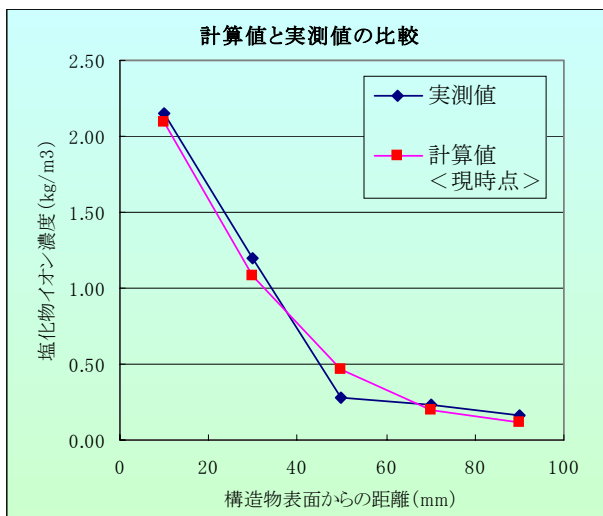
※見掛けの拡散係数が小さいと、コンクリートの内部に塩分が侵入しにくく、表面と内部の濃度差が大きくなる。

※表面塩化物イオン量が小さいと、外部からの塩分の供給が少なくなるので、コンクリート内部の塩化物イオン量が全体的に低下する。

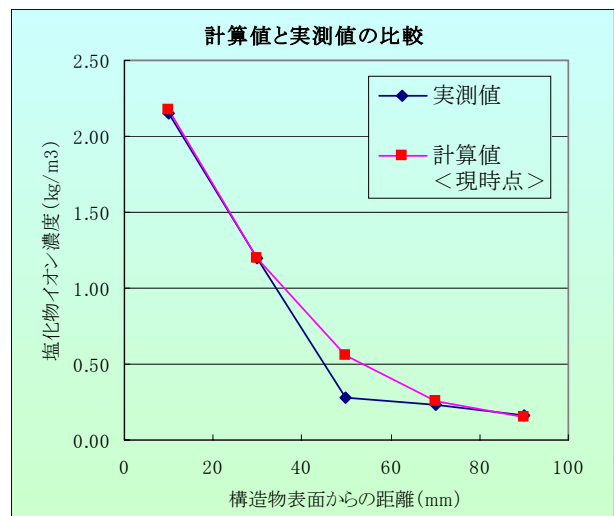
データの採否

付図-1.3の状態では推定を終わってもよいと思われるが、構造物表面から50mmのデータのみ、計算値からの解離が大きいのでこのデータを無視することを考えた。付図-1.3の状態では、誤差の平均を見ると0.331である。ここで、データ3の採否の欄(セルF8)を0とすると誤差の平均は0.079となる。さらに誤差の平均が小さくなるようにデータを調整すると、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それぞれ、 2.63kg/m^3 、 $0.46\text{cm}^2/\text{年}$ 、 0.12kg/m^3 としたときに、実測値(50mmのデータを除く4点)と計算値が良く合致することが明らかになった。そこで、これらの値を採用することにした。

この状態でシート右下に表示されるグラフは、付図-1.4の通り。



付図-1.3 入力後のグラフ表示(その3)



付図-1.4 入力後のグラフ表示(その4)

将来推定

ここでは、将来推定年(セルC19)に2009を入力しているので、2009年における塩化物イオン濃度の分布が、セルN6～N10の範囲に示される。この構造物では、鉄筋のかぶりが70mmであったが、10年後には、この位置の塩化物イオン濃度が現在の約2倍の $0.49\text{kg}/\text{m}^3$ 程度になると推定される。

また、将来推定年の代入値を変化させて、任意の位置が任意の塩化物イオン濃度に達する時期を推定することもできる。例えば、構造物表面からの距離が70mmの位置で、塩化物イオン濃度が鉄筋の腐食が始まるおそれがある $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ に達する時期を調べると、2063年ごろ(調査から64年後)であると推定された。

※この状態のワークシートが、分析シートファイル中のワークシート「分析例付属1」として保存されている。

付録2. Q & A 集

目次

塩化物イオン分布の将来予測に関するもの

- Q1 塩化物イオンの拡散法則について
- Q2 入力するパラメータの意味について
- Q3 各予測値の目安について

分析シートの計算手法に関するもの

- Q4 誤差関数の計算について
- Q5 誤差の平均について
- Q6 適用外のデータを分析する場合

フィッティングのテクニックに関するもの

- Q7 予測する数値の桁数について
- Q8 初期塩化物イオン量の予測について
- Q9 コンクリート表面付近におけるデータについて
- Q10 フィッティングの個人差について

- | |
|---|
| Q1 塩化物イオンの拡散とは何ですか。
フィックの拡散法則とは何ですか。 |
|---|

- A1 申し訳ありませんが、この分析シートは、コンクリート構造物の塩害に関する劣化予測(塩化物イオンの拡散法則など)について、ある程度基礎知識をお持ちの方を対象に作成しています。上記のような点については、以下の文献やその他の技術図書を参照してください。

土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書 [施工編]，2002.3

日本コンクリート工学協会：コンクリート診断技術 '03，2003.1

土木研究所，プレストレスト・コンクリート建設業協会：ミニマムメンテナンスPC橋の開発に関する共同研究報告書(2)ーコンクリート道路橋の必要かぶりに関する検討ー，共同研究報告書第258号，2000.12

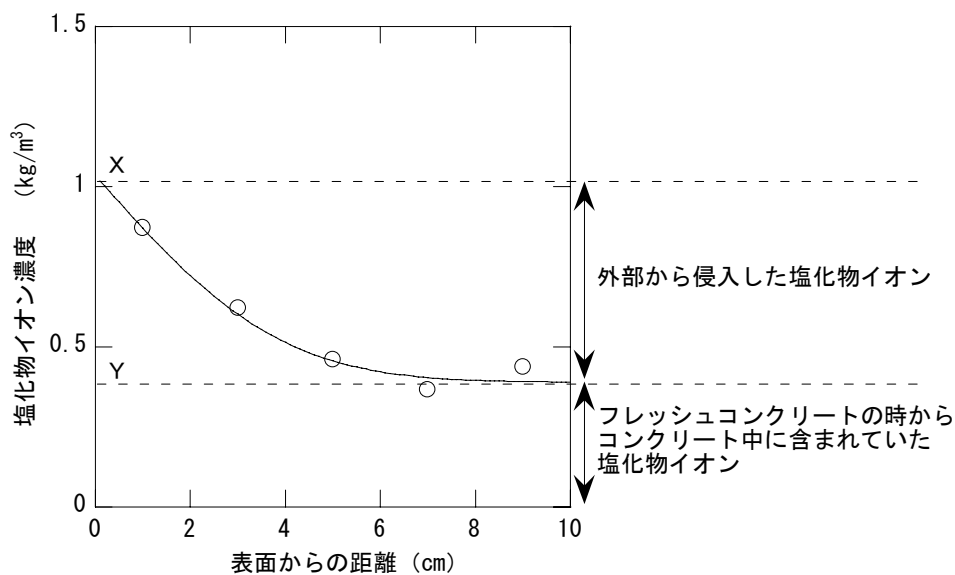
Q2 分析の際に入力する表面塩化物イオン量，見掛けの拡散係数，初期塩化物イオン量の値と塩分分布の計算結果の関係について教えてください。

A2 分析(推定)する三つのパラメータは，それぞれ以下のような意味を持ち，計算値の大きさや曲線の傾きに影響を与えます。

表面塩化物イオン量: 構造物のごく表面部に位置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，付図-2.1の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，拡散の速度を表す係数，推定曲線の形状(傾きの大きさ)に影響

初期塩化物イオン量: コンクリート中に当初から(フレッシュコンクリートの時から)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，付図-2.1のYの値に対応



付図-2.1 各パラメータの意味(グラフは一例)

Q3 表面塩化物イオン量と見掛けの拡散係数については、標準的な値が示されていますが、これはどのような方法で求めたものですか。また、分析の結果これらの値から外れた推定値が得られた場合には、どう解釈すべきですか。

A3 構造物の耐久性設計の際に使用する表面塩化物イオン量や見掛けの拡散係数の値については、コンクリート標準示方書〔施工編〕に記載があります。しかし、実構造物から採取した試料を分析すると、設計で想定していた数値と大きく異なる場合もあります。これは、設計上の仮定(例えば、表面塩化物イオン量等が供用期間を通じて一定である)と実環境の違いから生じるものと考えられます。

そこで、この分析シートでは、58件の実構造物における塩化物イオンの濃度分布を分析した結果を元に、標準的な値を示しました。しかし、実際に分析を行うと、表面塩化物イオン量と見掛けの拡散係数の推定結果がこの標準的な値の範囲に入らないこともあります。したがって、標準的な値の範囲から外れた推定値が、直ちに誤りと判定されるわけではありませんが、推定の仕方等に何らかの誤りがあることも考えられますので、以下の点を再度確認してください。

- 1) 塩化物イオン量の測定結果や調査年などに、入力ミスがないか。
- 2) 計算値の曲線を、無視すべき測定データにフィッティングさせていないか(Q8, Q9)。各パラメータを変更することでより良く測定データにフィッティングさせることができないか。
- 3) 構造物は、外部からの塩分が供給される環境に位置しているのか。そもそも塩化物イオンの拡散法則で、塩化物イオン濃度を説明するのが妥当なのか(Q9)。

※標準的な値を定める際に参考にした58件の実構造物の塩化物イオン分析結果は、以下の文献に掲載されています。

土木研究所: 既存コンクリート構造物の健全度診断技術－1999年調査結果－, 土木研究所資料第3854号, 2002.3

Q4 推定結果と別に得られる誤差の平均(セルI17)とは、なんですか。また、採否(セルF6～F10)にはどんな意味がありますか。

A4 ここでいう誤差の平均は、各測定箇所ごとに求められた誤差(付式-2.1)の標準偏差で、塩化物イオンの測定データと各パラメーターから決定される計算値との乖離の程度を示す目安です。誤差の平均は、フィッティング作業を行う際の参考とするために表示しているもので、値自体には特段の意味はありません。分析シートに表示されるグラフ上で、測定データと計算値が比較的良

く合致している場合には、誤差の平均の大きさを気にする必要はありません。

採否は、上記の誤差の平均を計算する際に、各測定データを有効なものとして扱うかどうかを定めるためのパラメータで、フィッティング作業を補助する以外の意味はありません。採否の欄に0を入力しても、分析シート上のグラフには何ら影響しません。

なお、塩化物イオン濃度の実測値が0.05kg/m³未満の箇所は、採否に関わらず、誤差の平均の計算時に考慮されません。

$$X = \frac{C_c - C_m}{C_m} \quad \dots\dots (2.1)$$

ただし、 X : (各測定点における)誤差
C_m : 塩化物イオン濃度の実測値
C_c : 塩化物イオン濃度の計算値

Q5 この分析シート上で、誤差関数はどのように取り扱われていますか。

A5 誤差関数(付式-2.2)は、付式-2.3で近似して計算しています。

$$\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta \quad \dots\dots (2.2)$$

ただし、 erf() : 誤差関数

$$1 - \operatorname{erf}(s) = 1 / (1 + 0.278393s + 0.230389s^2 + 0.000972s^3 + 0.078108s^4)^4 \quad \dots\dots (2.3)$$

Q6 塩化物イオン濃度の実測値が10点以上ある場合や、塩化物イオン濃度の測定箇所が、コンクリート表面からの距離で200mmを超える場合には、どうすればいいでしょうか。

A6 分析シートでは実測値を10点までしか入力できませんので、測定点の内で外部からの塩分の侵入状況をよく表していると考えられる10点を選定し、分析に用いてください。

分析シートでは、測定箇所がコンクリートの表面からの距離で200mmを超える箇所については、計算を行っていませんので、誤った計算結果が得られます。ただし、計算用のワークシート(配布時には非表示に設定)を改造することで、比較的簡単に計算の範囲を広げることができます。

Q7 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して入力する際，何桁まで検討するとよいでしょうか。

A7 表面塩化物イオン量と初期塩化物イオン量の推定では，塩化物イオンの試験結果に合わせて小数点以下2桁まで推定するのが良いでしょう。見掛けの拡散係数は，有効桁数2桁で推定すると良いでしょう。

Q8 分析の開始時に初期塩化物イオン量を推定する方法を教えてください。
初期塩化物イオン量の推定で，注意すべき点はありますか。

A8 初期塩化物イオン量は，フレッシュコンクリートの時から既にコンクリート中に入ったと考えられる塩分の量です(Q2, 付図-2.1参照)。分析の開始時に入力する値は，以下を参考にして初期値を設定すると良いでしょう。

- 1) 構造物の最も内部から採取した試料で測定した塩化物イオン濃度が $0\text{kg}/\text{m}^3$ の場合，初期塩化物イオン量も $0\text{kg}/\text{m}^3$ と推定する。
- 2) コンクリート内部のデータが数点連続して同程度の値を示す場合(例えば，付図-2.1)，その平均的な値を初期塩化物イオン量と推定する。
- 3) 1)2)に該当しない場合には， $0\text{kg}/\text{m}^3$ と仮定する。

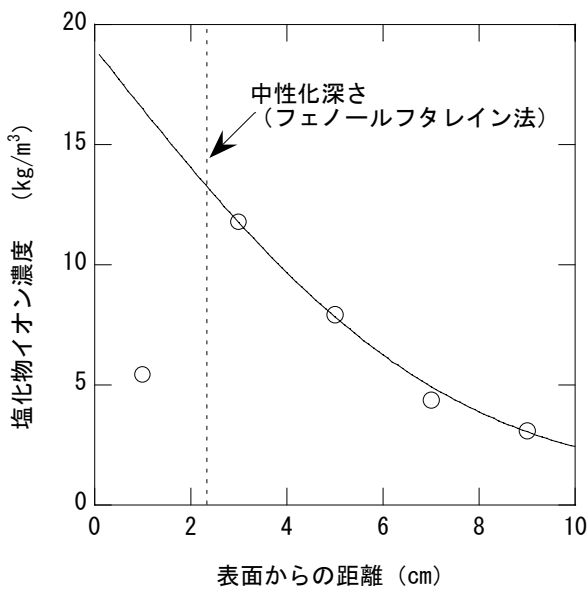
※塩化物イオン濃度の実測値として約 $0.05\text{kg}/\text{m}^3$ 以下の値が記入されている場合は，注意が必要です。塩化物イオン濃度が著しく小さいデータには，実際に塩化物イオンを分析した結果としてその値が得られた場合と，塩化物イオン濃度が小さすぎて分析できず，測定装置等の分解能が記入されている場合の二通りがあります。したがって，このような場合は，前者であることが明らかでない場合を除き，この部分の塩化物イオン量は $0\text{kg}/\text{m}^3$ であると考えるのが良いでしょう。

※初期塩分の由来としては，骨材表面に付着していたものや混和剤中に含まれていたものなどが考えられます。初期塩分に起因するコンクリート構造物の塩害を避けるため，レディーミクストコンクリートの受け入れ時には塩化物イオンの試験を行うことが定められており，初期塩分量は，通常 $0.3\text{kg}/\text{m}^3$ 以下とされています。ただし，このような規準類が整備されていなかった1986年以前の構造物では，コンクリート中に建設当初から多量の塩分が含まれている場合があります。

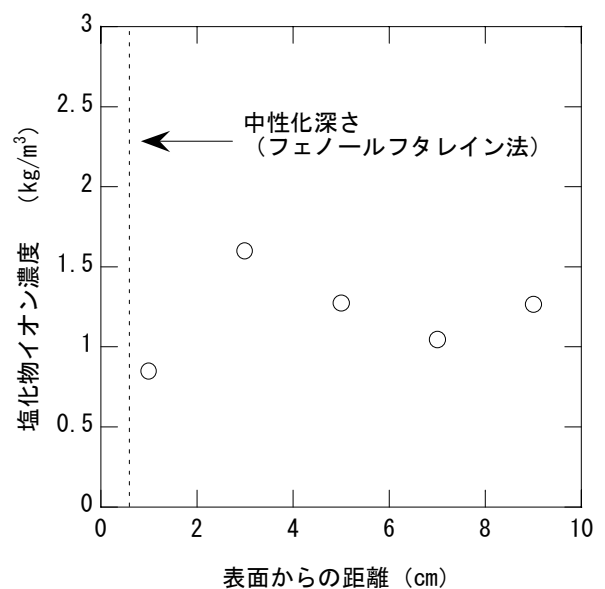
Q9 コンクリート表面に近い箇所の塩化物イオン量の実測値がコンクリート内部よりも小さい場合があるのですが、どのように分析したらよいでしょうか。

A9 コンクリートが構造物表面から中性化(炭酸化)した場合、中性化した領域に含まれていた塩分が、構造物内部の未中性化領域へと移動すると考えられています。したがって、中性化の影響を受けていると推測されるデータについては、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推定時には、無視してください(付図-2.2)。

コンクリートが中性化していないにもかかわらずコンクリート表面付近の塩化物イオン濃度が小さい場合や、(中性化の有無に関わらず)塩化物イオンの実測値が不規則に並んでいる場合には、塩化物イオンの拡散法則によって(つまり、分析シートで)塩化物イオン濃度の分布を説明したり、将来予測を行うことはできません(付図-2.3)。



付図-2.2 塩化物イオンの濃度分布が中性化の影響を受けている事例



付図-2.3 拡散法則で塩化物イオンの濃度分布を推定するのが不適当な事例

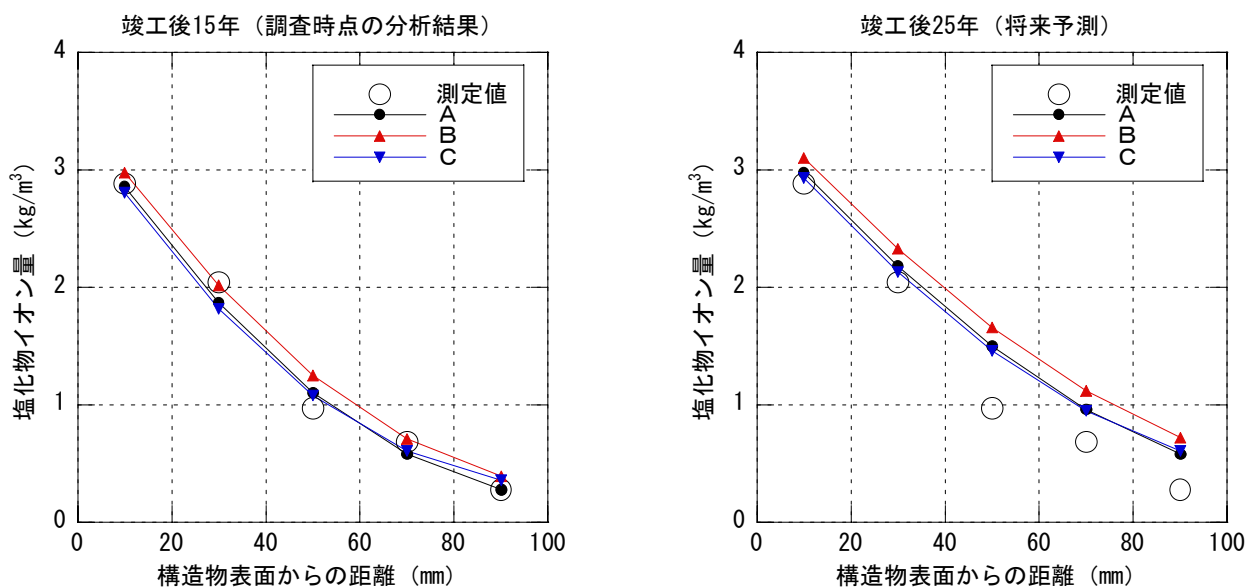
Q10 推定を手作業で行うので、個人差が気になります。

A10 参考までに、いくつかの事例について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付図-2.4～2.6に示します。分析結果に多少の個人差があっても、構造物の維持管理計画を立てる際の参考にする場合には、大きな問題となることはないものと考えられます。

確かにこの分析シートを用いたフィッティングには個人差が生じますが、塩化物イオン量の測定誤差や中性化の影響(Q9)など様々な要因を考慮してデータの採否を決定するには、結局、技術者の判断が必要です。したがって、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算出部分を自動化しても、プログラムや使用者によって算出結果が違ってくることは避けられません。

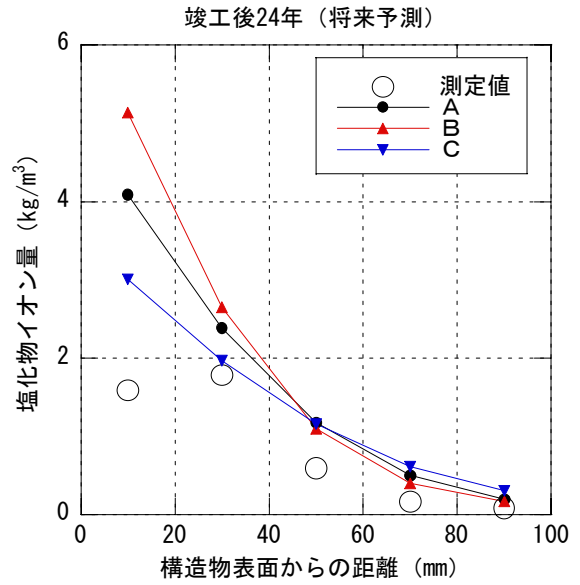
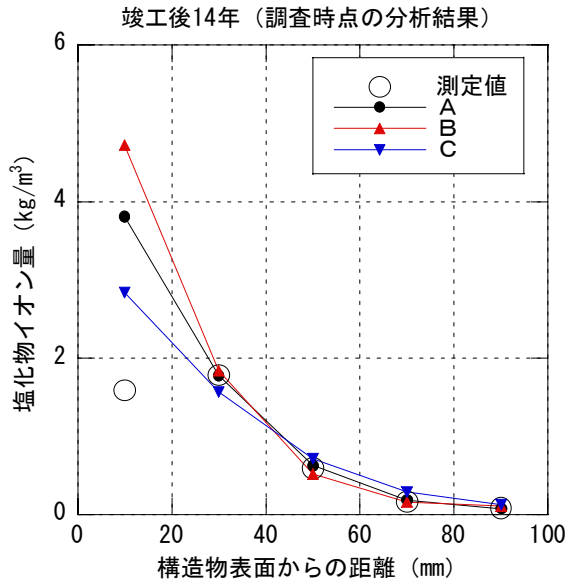
※例えば、資料1に示した事例のような場合、付図-1.3と付図-1.4のどちらが優れているかは、一概には決められません。

※付図-2.4～2.6について：分析シートの作者(技術者A)に加え、技術者4人が分析を行った。そのうち比較的Aと異なる推定を行った2名分を示した。



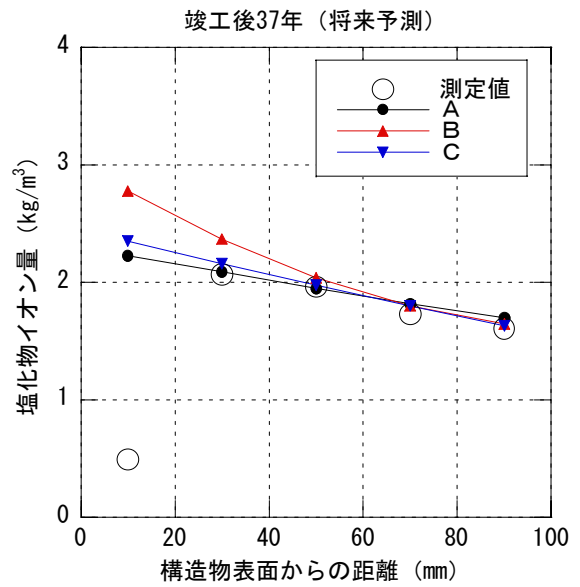
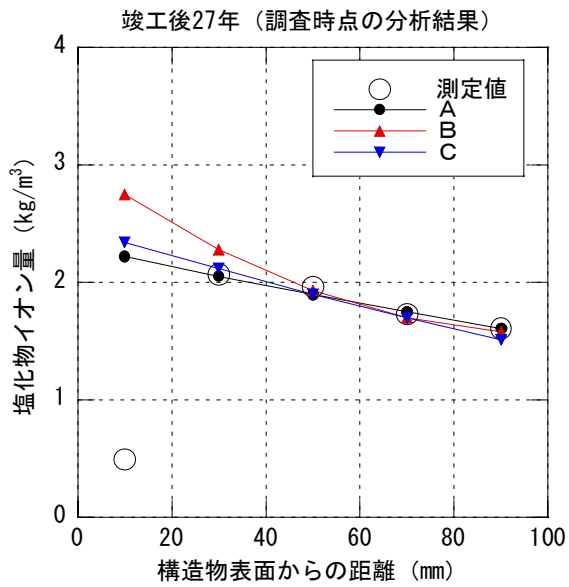
分析者	推定結果		
	表面塩化物イオン量 (kg/m³)	見掛けの拡散係数 (cm²/年)	初期塩化物イオン量 (kg/m³)
A	3.34	0.81	0.05
B	3.40	0.90	0.10
C	3.15	0.70	0.20

資図-2.4 塩化物イオン濃度の分析例(その1)



分析者	推定結果		
	表面塩化物イオン量 (kg/m ³)	見掛けの拡散係数 (cm ² /年)	初期塩化物イオン量 (kg/m ³)
A	5.00	0.35	0.05
B	6.50	0.25	0.10
C	3.50	0.50	0.07

資図-2.5 塩化物イオン濃度の分析例(その2)



分析者	推定結果		
	表面塩化物イオン量 (kg/m ³)	見掛けの拡散係数 (cm ² /年)	初期塩化物イオン量 (kg/m ³)
A	1.30	2.9	1.00
B	1.50	0.4	1.50
C	1.80	3.0	0.65

資図-2.6 塩化物イオン濃度の分析例(その3)