

論文 中性化進行の影響を受けた塩分濃度分布における塩害環境の厳しさの程度を表す特性値および浸透予測方法に関する考察

青山實伸*1・有馬直秀*2・川村満紀*3

要旨：塩化物イオン濃度分布の最大値は、中性化の進行とともに未中性化部分方向に移動する。凍結防止剤の影響を受ける条件下で中性化が進行した実構造物での塩化物イオン浸透状況の調査結果から、塩化物イオン濃度分布の形状等を分析した。塩化物イオン濃度の最大値が内部方向に移動している濃度分布で、中性化の進行のない状態での塩害環境の厳しさの程度を表す指標（表面における塩化物イオン濃度）としての特性値の評価方法を提起した。また、中性化の進行に伴う塩化物イオンの浸透の経年変化を模擬化することによって得られた結果に基づいて中性化進行に伴う塩化物イオン濃度分布の浸透予測方法について考察した。

キーワード：中性化, 塩害環境, 表面における塩化物イオン濃度, 浸透予測

1. はじめに

北陸地方のコンクリート構造物では、塩害やアルカリ骨材反応による劣化が顕在化している。また、コンクリート中の中性化が塩害による劣化を助長しているようである。特に雨水のかからない RC 床版部材では、中性化の進行が早いことから¹⁾、凍結防止剤散布（塩害）と中性化による鉄筋腐食の複合劣化が潜在化しつつある。

十分に除塩されていない海砂を含むコンクリートでは、中性化が進行すると塩化物を固定化しているフリーデル氏塩は分解され、塩化物イオンが解離し、それが内部に向かって移動するために、未中性化部分の塩化物イオンの濃度が高くなると考えられている²⁾。しかし、海砂を含まないコンクリートにおいても、凍結防止剤の影響を受ける部位においては、中性化の進行とともに、内部の未中性化部分の塩化物イオン濃度が高くなっている構造物³⁾が多く見られる。

著者らは、建設後長年月を経た構造物から採取した中性化が進行したコアを用いて、塩化物イオンの浸透促進試験と自然曝露試験によって、中性化部分に浸透した塩化物イオンが短期間に未中性化部分に移動する現象を確認している³⁾。この移動現象は、中性化部分と未中性化部分との間で、水分の吸水・逸散の性状が異なることに起因し、したがって、乾湿繰り返しを受けることによって生じると推察している⁴⁾。そのため、中性化の進行に伴って、コンクリート中の塩化物イオン濃度の最大値は、中性化した部分と未中性化部分との境界付近位置に生じ、最大値の位置は中性化の進展に伴って次第に深部に向かって移動すると考えられる。

本論文は、実際の構造物から得られたコアを用いて中性化進行に伴う塩化物イオン濃度分布の最大値が内部方

向に移動する現象を分析した。まず、凍結防止剤の影響を受けた実際の構造物に対する調査から得られた塩化物イオン濃度分布等に関するデータを分析し、コンクリート中の塩化物イオン濃度分布のパターンを明らかにするとともに、見かけの拡散係数を求めた。つぎに、土木学会標準において与えられる中性化が進行した部位の表面における塩化物イオン濃度の値は過大であり、実際の塩害環境を反映したものにならないことから、中性化の進行のない状態での塩害環境の厳しさの程度を表す表面における塩化物イオン濃度に相当する特性値の評価方法を提起する。さらに、中性化の進行に伴う塩化物イオン浸透の経年変化状況を模擬化することによって、中性化進行に伴う塩化物イオンの浸透予測方法について考察した。

2. 実構造物の塩化物イオン濃度分布

2.1 調査の概要

(1) 調査した実構造物

分析に供したデータは、北陸3県にある高速道路橋の凍結防止剤の影響を受け、塩害による鉄筋腐食で劣化した RC 中空床版橋（桁端部、張出し部）と下部工（橋台、橋脚）の RC 部位に対する補修対策のために実施した事前調査において得られたものである。調査対象となったのは 44 橋梁であり、調査対象部位数は上部工が 59、下部工が 80 であり、全体として 139 部位が対象となった。調査時の構造物の経過年数は平均 36 年（29～41 年）である。

(2) 調査の方法

塩害による鉄筋腐食によって浮きが発生している部分の近傍（約 0.1 m 程度離れた位置）で調査を行なっている。調査項目は、塩化物イオンの浸透状況、中性化深さ、

*1 ジャパン測量（元 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株）金沢支店 道路技術部）博士(工)(正会員)

*2 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋（株）金沢支店 道路技術部 構造技術課 技術主任 博士(工)(正会員)

*3 金沢大学名誉教授 工学博士（名誉会員）

鉄筋腐食度である。塩化物イオン濃度はコンクリート表面より 20 mm 間隔で深さ 100 mm までドリル法により試料採取を行い、JISA1154 による電位差滴定法で測定したものである。中性化深さの測定は、ドリル法による試料採取位置周囲で実施した鉄筋腐食度調査のための 100 × 100 mm 寸法のハツリ調査面に対して実施した。

2.2 調査結果の分析

(1) 塩化物イオン濃度分布

塩化物イオン濃度分布のパターンを分類すると、図-1 の事例に示すように 3 種類のパターンになる。Type1 は塩化物イオン濃度の最大値がコンクリート表面近傍にある分布、Type2 は中性化によって最大値が内部に移動している分布、Type3 は分布形状が不規則で Fick's の第 2 法則の解 (以下、拡散式) で回帰できない分布である。中性化深さが小さい場合、塩化物イオンの分布は Type1 となり、内部に発生した鉄筋腐食によって発生したひび割れ等から塩化物イオンが浸透する場合は Type3 となると考えられる。

分析した全データから得られる塩化物イオン濃度分布パターンの構成比率を図-2 に示す。データ数 139 の分布パターン (平均) の構成比率は、Type1 が 20 %、Type2 が 73 %、Type3 が 7 %になる。この結果は、塩化物イオン濃度分布の多くは、塩分濃度の最大値が中性化によって内部に移動している Type2 のパターンであることを示している。著者らは、約 16 年前に北陸地方の高速道路の RC 中空床版 (桁端部) の濃度分布パターンを分析している⁹⁾。約 16 年前の分析では、調査部位の平均経過年数は 19 年であり、分布パターンの構成比率は Type1 が 66%、Type2 が 16%であった。調査の対象とした橋梁は両者間で異なるが、両者は概ね同じ時期に建設された橋梁である。

約 16 年の間で Type2 の濃度分布パターンをもつ橋梁の数が圧倒的に増大している。その原因として中性化の進行が塩化物イオンの分布に影響したと考える。

(2) 中性化深さと見かけの拡散係数

全調査データの中性化深さの分布を図-3 に示す。中性化深さの平均値は 15.3 mm であり、一部の測定値は 35 mm を超えている。Type1 と Type (2+3) の中性化深さごとの累積構成比率を図-4 に示す。Type1 は、Type2 に比べ中性化深さは小さい傾向にあるが、その逆の場合もある。これは、ドリル法による試料採取位置と中性化測定位置が異なっていることによると推察される。

Type1 および Type2 の分布データから拡散式によって回帰でき、見かけの拡散係数 (以下、 D_{ap} 値) を算定できたデータの D_{ap} 値の分布を図-5 に示す。分布は概ね対数正規分布を示し、見かけの拡散係数の平均値は 0.60 $cm^2/年$ である。

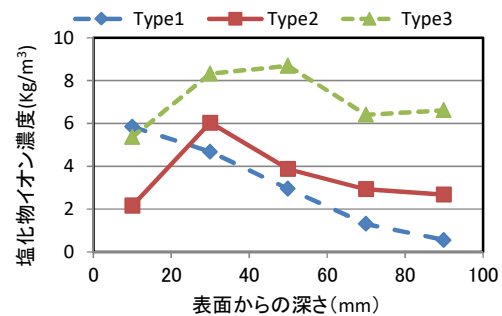


図-1 塩化物イオン濃度分布のパターン

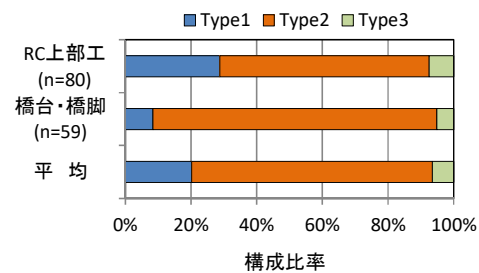


図-2 塩化物イオン濃度分布パターンの構成比率

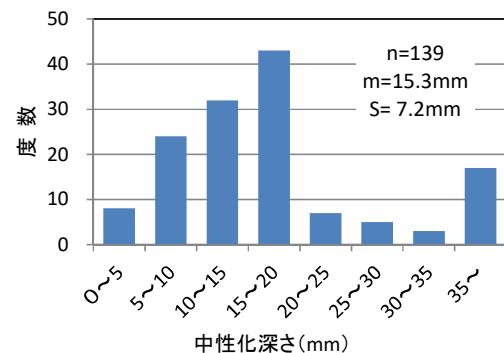


図-3 全調査データの中性化深さの分布

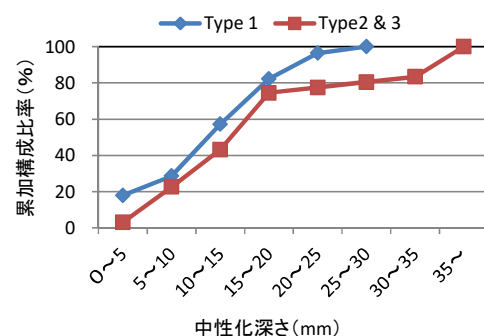


図-4 Type 別の中性化深さごとの累積構成比率

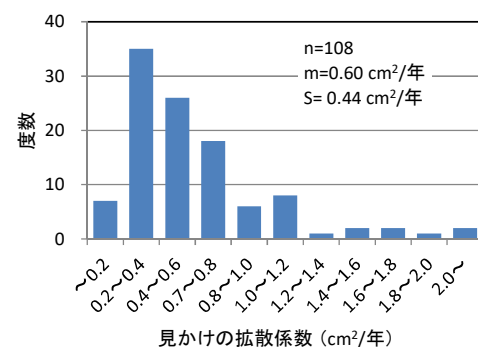


図-5 データの見掛けの拡散係数の分布

(3) 表面における塩化物イオン濃度

次項で詳述する土木学会規準 JSCE-G573-付属書 B によって求めた表面における塩化物イオン濃度の分布を図-6 に示す。表面における塩化物イオン濃度の全体の平均値は 10.3 kg/m^3 である。中性化の進行のない状態での表面における塩化物イオン濃度は、主に塩害環境とコンクリートの表面組織の相互作用によって決まると考えられる。しかし、中性化が進行した部位では、土木学会規準によって求められた表面における塩化物イオン濃度は過大となり、この基準に与えられている値は塩害環境の厳しさの程度を表す特性値にならないと推察する。

て、未中性化部分との境界付近位置での塩害環境とコンクリート組織との相互作用が生じるように変化すると推察する。未中性化状態のコンクリート表面の組織と中性化進行後の未中性化部分の組織は、ほぼ同じと考えられる。そのため、未中性化状態の表面における塩化物イオン濃度は、中性化進行後の内部の未中性化部分の境界付近位置に移行して、概ね同じ塩化物イオン濃度になると推察する。従って、中性化が進行すると、図-8 に示すように中性化の進行前の表面における塩化物イオン濃度値は、中性化深さ位置にシフトして、塩化物イオン濃度分布の最大濃度となって、それは塩害環境の厳しさの程度を表すと推察する。

3. 表面における塩化物イオン濃度に関する検討

3.1 中性化に伴う塩化物イオンの内部への移動

著者らが実施した、中性化部分に浸透した塩化物イオンが短期間に未中性化部分に移動する現象を確認した実験結果を示す³⁾。実験は、中性化の進行した床版コア(径 90mm)を用いて、コアに塩水噴霧乾湿繰返し試験(1日間塩水噴霧・6日間乾燥を56日間、温度 40° ・乾燥時湿度 60%)によって塩分の浸透を促進させた。試験後に試験体のコア断面を2分割して、片方のコア用いて塩分濃度を測定した。残り片方は分割面にエポキシ樹脂塗装を行い、塩分移動性を把握するための自然曝露試験(1, 3, 6ヶ月)を実施し、曝露試験終了後に塩分濃度分布を測定した。促進試験後および自然曝露試験後の塩分濃度分布の変化を図-7 に示す。これらの図より、自然曝露試験では、表層部の塩分は、概ね3~6ヶ月後に未中性化領域に移動し、塩分濃度のピークは中性化深さの最大値付近位置に移動する。この移動現象は、中性化部分と未中性化部分との水分の吸水・逸散の性状の違いに起因し、外部雰囲気湿度の変化による乾湿繰返しを受けることによって生じると推察される⁴⁾。

この現象において、中性化の進行がない状態での塩害環境とコンクリート表面での相互作用は、乾湿繰返しに起因する塩化物イオンの未中性化部分の内部に移動し

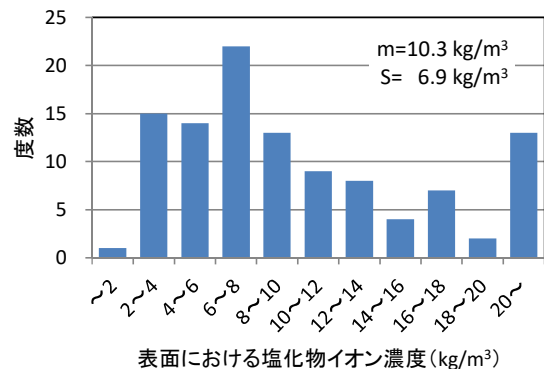


図-6 土木学会規準によって求めた表面における塩化物イオン濃度の分布

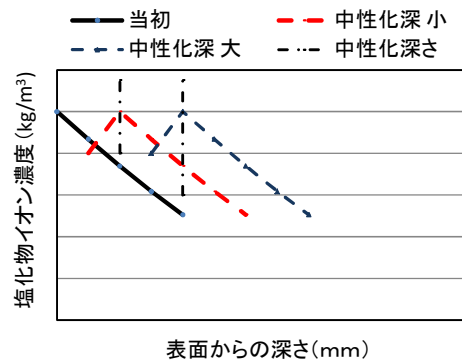


図-8 中性化進行に伴う塩化物イオン濃度分布の変化

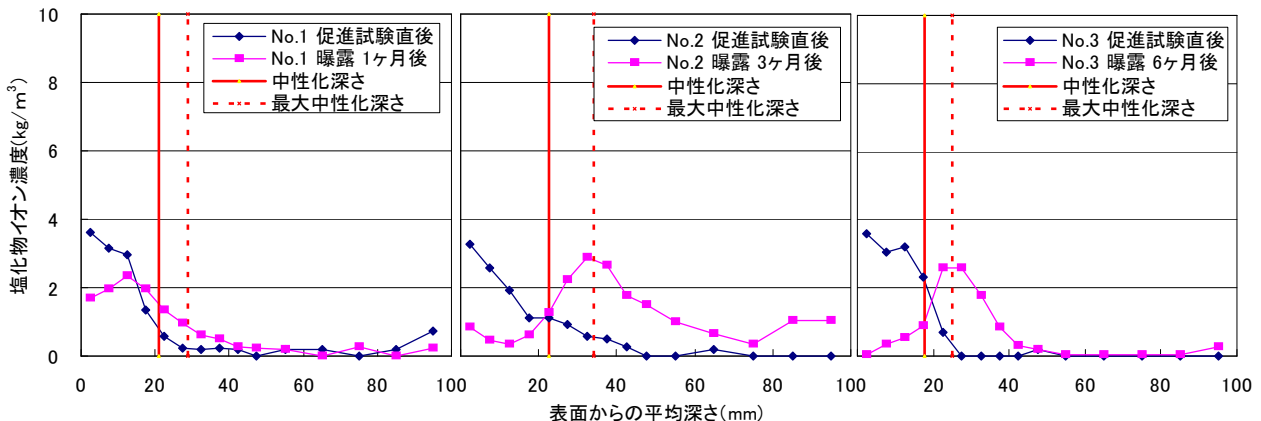


図-7 促進試験後および自然曝露試験後の塩化物イオン濃度分布の変化

3.2 塩害環境の厳しさの程度を表す特性値

(1) 土木学会規準における表面の塩化物イオン濃度

実際の構造物のコンクリート中の塩化物イオン濃度分布は、近似的に拡散式によって表される。拡散式中の係数、表面における塩化物イオン濃度（以下、 C_0 値）と見かけの拡散係数（ D_{ap} 値）の算出方法は、土木学会規準 JSCE-G573-付属書 B で図-9 のように与えられている。この規準では、中性化深さ+10 mm 間の測定データを除外して係数を求めるとしている。示方書に与えられる C_0 値は、塩害環境の厳しさの程度を表す指標であるが、中性化している場合には、図-9 から求まる C_0 値は、過大な値になり、塩害環境を表す指標として用いることはできない。

(2) 塩化物イオン濃度分布における塩害環境の厳しさの程度を表す位置

拡散式によって、 C_0 値と試料採取間隔 20 mm の場合の平均深さ 10 mm 位置の塩化物イオン濃度（ C_{10} 値）を求め、経過年数を変化させたときの見かけの拡散係数と C_0 値/ C_{10} 値の理論比との関係は図-10 のようになる。図-10 より C_0 値/ C_{10} 値は 1.1~1.6 の範囲に分布することがわかる。図-2 に示す Type1 および Type2 の C_0 値/測定最大（ C_{max} ）値の比の構成分布を求めると図-11 のようになる。 C_0 値/ C_{max} 値の比は、Type1 では概ね理論比 1.1~1.6 の範囲に分布するが、Type2 の比は 1.6 を超えて 2.4 程度までの広範囲に分布しており、Type2 では、 C_0 値は塩害環境の厳しさの程度を適切に表さないことがわかる。

Type2 の塩化物イオン濃度分布の場合には、塩害環境を適切に示す位置を検討する必要がある。それらの位置は、“測定最大値の試料採取範囲の表面側”と“中性化深さ”の 2 ケースについて行なう。まず、“ C_{max} の試料採取範囲の表面側”の位置での塩化物イオン濃度（ C_{max-10} 値）を拡散式の回帰式によって算定する。つぎに C_{max-10} 値/ C_{max} 値の比を求め、それらの値の分布の構成比率を図-11 に示す。図より C_{max-10} 値/ C_{max} 値の比は、図-10 で示した理論比 1.1~1.6 の範囲に分布することが分かる。同様に中性化深さ位置に着目して拡散式の回帰線から塩化物イオン濃度（以下、 C_{car} 値）を算定する。 C_{car} 値/ C_{max} 値の比を求め、その分布の構成比率を図-11 に示す。 C_{car} 値/ C_{max} 値の比は 1.6 を超える部分が増えている。以上の検討結果から、“ C_{max} 値の試料採取範囲の表面側”位置で拡散式の回帰式から求めた塩化物イオン濃度は、概ね外部の塩害環境と同等の値を示していると推察される。なお、これらの検討は、採取試料間隔が 20 mm で行なわれたものであり、塩化物イオン濃度の測定位置と中性化深さの測定位置が異なっているという条件の下での分析であることに留意する必要がある。

なお、Type1 の C_0 の平均値は 7.1 kg/m^3 、Type2 の C_{max-10}

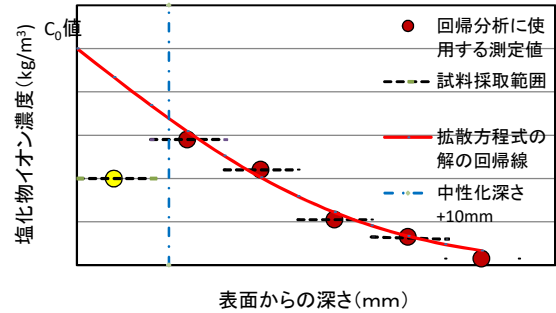


図-9 土木学会規準による C_0 値と D_{ap} 値の算出方法

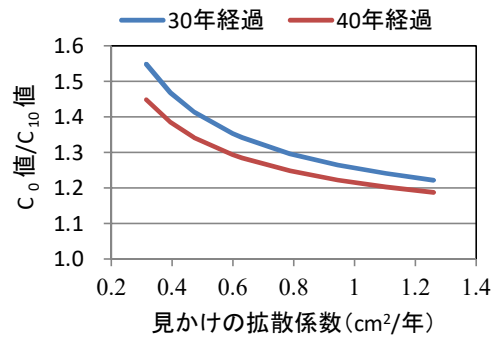


図-10 見かけの拡散係数と C_0 値/ C_{10} 値の理論比との関係

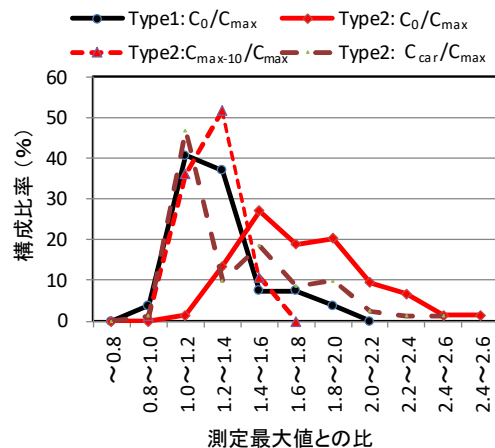


図-11 Type1 と Type2 の C_0 値/ C_{max} 値の比および Type2 の C_{max-10} 値/ C_{max} 値と C_{car} 値/ C_{max} 値の比との構成比率

の平均値は 7.2 kg/m^3 であり、両者ともほぼ同じ塩害環境を示していると言える。

(3) 表面における塩化物イオン濃度相当値の提案

中性化の影響によって表面部の塩化物イオン濃度が拡散式の回帰線より得られた値より小さい場合は、調査によって得られた“測定最大値（ C_{max} 値）の試料採取範囲の表面側”位置で拡散式の回帰式で求めた塩化物イオン濃度を“表面における塩化物イオン濃度相当値（ C_r 値）”に置き換え、塩害環境の厳しさの程度を表す特性値とすることを提案する。塩化物イオン濃度相当値（ C_r 値）の求め方の概念図を図-12 に示す。 C_r 値は、中性化の進行がない場合での表面における塩化物イオン濃度（ C_0 値）

とほぼ同じ値になり、このようにして得られた値は、外部の塩害環境の厳しさの程度を推定するための特性値と考えてよい。

4. 中性化進行に伴う塩化物イオン濃度分布の浸透予測方法に関する検討

4.1 検討概要

図-8に示した考え方によって、”塩害環境の厳しさの程度を表す表面における塩化物イオン濃度は、中性化の進行に伴って中性化深さ位置にシフトする”，とした場合の中性化の進行経過と塩化物イオン浸透の推移過程を、拡散式の差分法を用いてシミュレーションの計算を行う。

シミュレーションに用いる差分式を図-13に示す。差分法によるシミュレーションの計算において用いた C_0 と D の値を表-1に示す。中性化深さの進行は、2mm単位で進むと仮定してシミュレーションの計算を行なう。

4.2 シミュレーションによる検討結果

中性化進行に伴う塩化物イオン濃度分布の変化のシミュレーション計算の結果の一例を図-14に示す。この計算で用いた係数の値および条件は、表面における塩化物イオン濃度 10 kg/m^3 、見かけの拡散係数 $0.63 \text{ cm}^2/\text{年}$ 、中性化速度係数 $3.5 \text{ mm}/\sqrt{\text{年}}$ という値を用いて10年、20年、50年後の塩化物イオン濃度分布を予測している。図より

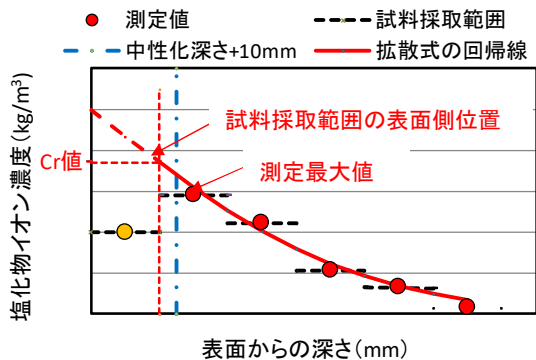


図-12 表面における塩化物イオン濃度相当値 (C_r 値)の求め方の概念図

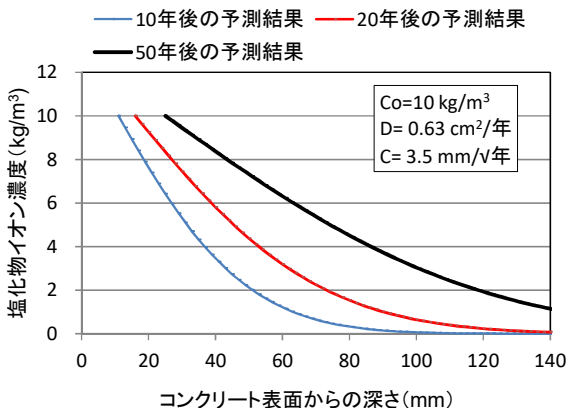


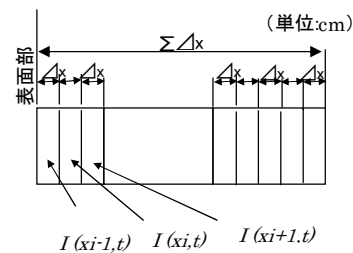
図-14 中性化進行に伴う塩化物イオン濃度分布の変化のシミュレーション計算の結果の一例

中性化の進行に伴って、内部により多くの塩化物イオンが浸透することがわかる。

予測した塩分濃度分布から、中性化進行による見かけの拡散係数の経年変化を求めると図-15のようになる。図より経過年数10年までは中性化の進行速度が大きいため見かけの拡散係数が漸減すると推察される。10年経過以降の見かけの拡散係数は、中性化進行速度が小さくなるためほぼ同じ値で推移している。

4.3 中性化進行に伴う塩化物イオン浸透予測方法の考察

図-14に示すシミュレーション計算の結果を用いて、20年経過時点において塩化物イオン濃度分布を調査したと仮定して、中性化進行を考慮に入れるか否かによる50年後の塩化物イオン濃度分布の相違を予測した結果を図-16に示す。図より例えば鉄筋かぶり70mm位置では、中性化進行を考慮する場合は考慮しない場合に比べ、予測値は約14%程度大きくなると言える。この差は鉄筋かぶりが小さくなるほど拡大する。同様に他の係数値および条件でのシミュレーション計算を行い、鉄筋かぶり



$$C(x_i, t + \Delta t) = D \times \frac{A}{(\Delta x)} \times \Delta t + I(x, t)$$

$$\text{ここに、} A = \{C(x_{i-1}, t) - 2 \times C(x_i, t) + C(x_{i+1}, t)\}$$

ただし C : 塩化物イオン濃度 (kg/m^3)
 D : 見かけの拡散係数 (cm^2/s)

図-13 シミュレーションに用いる差分式

表-1 シミュレーション計算における係数値と条件

係数と条件	使用した係数の値と条件
C_0 値	10 kg/m^3
D 値	$0.32, 0.63, 0.95, 1.26 \text{ cm}^2/\text{年}$
中性化速度係数	$2.0, 3.5, 4.5 \text{ mm}/\sqrt{\text{年}}$
$\Delta x, \Delta t$	$\Delta x = 2\text{mm}, \Delta t = 5 \text{ 日}$

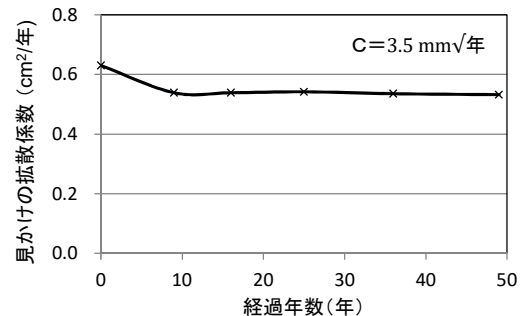


図-15 中性化進行による見かけの拡散係数の経年変化

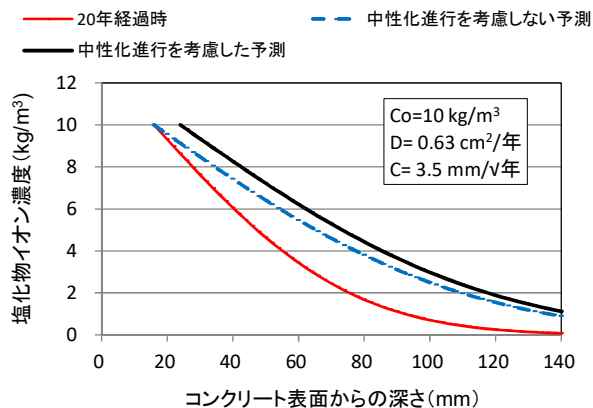


図-16 中性化進行の考慮に入れるか否かによる 50 年後の塩化物イオン濃度分布の相違の予測結果

表-2 鉄筋かぶり 70mm 位置での中性化進行を考慮に入れるか否かによる予測値の差 (%)

区 分	D 値(cm ² /年)	中性化速度係数 (mm/√年)		
		2.0	3.5	4.5
	0.32	13	24	46
	0.63	9	14	25
	0.95	7	10	19
	1.26	6	8	15

70mm 位置において中性化の進行を考慮に入れるか否かによる予測値の差を求め表-2 に示す。この表から両者の差は、見かけの拡散係数が小さくなるほど、中性化速度係数が大きくなるほど差は拡大することが分かる。

以上のシミュレーション計算の結果より、塩化物イオン分布浸透経過の予測においては、中性化進行を考慮する必要があることがわかる。将来における塩化物イオン濃度分布を予測する必要がある場合は、図-12 の赤色実線で示す“ C_r 値以深の塩化物イオン濃度分布の回帰線”を用いて見かけの拡散係数を求める。回帰式で求めた見かけの拡散係数 10 年経過後は大きく変化しないことを考慮に入れると、中性化深さ進行値をシフトした位置で求めた見かけの拡散係数を用いてシミュレーション計算を行って将来の塩化物イオン濃度分布を予測する方法を提案する。

5. まとめ

中性化進行に伴う表面塩化物イオン濃度と塩化物イオンの浸透の予測に関する研究で得られた知見をまとめると、次のようになる。

- 1) 30 年以上経過した RC 部位では、多くの部位で中性

化によって塩化物イオン濃度分布のピークの位置が内部に移動している。

- 2) 土木学会規準によって、中性化が生じている部位の塩化物イオン濃度分布より求めた表面における塩化物イオン濃度は過大となり、実際の塩害環境の厳しさの程度を表さない。
- 3) 未中性化状態の表面における塩化物イオン濃度は、中性化進行後においては、内部の未中性化部分の境界付近位置までシフトして、塩化物イオン濃度は最大となる。この結果は、塩害環境の厳しさの程度を表していると推察される。
- 4) 中性化進行の影響を受けた塩化物イオン濃度分布における塩害環境の厳しさの程度を表す特性値は、調査によって得られた測定値が最大となる試料採取範囲の表面側位置で拡散式の回帰式で求めた塩化物イオン濃度を“表面における塩化物イオン濃度相当値(C_r 値)”として用いることを提案する。
- 5) 中性化の進行を考慮に入れた場合の塩分浸透予測値は、考慮に入れない場合に比べ大きくなる。
- 6) 中性化進行を考慮に入れた塩化物イオン浸透の予測は、拡散式の回帰線から求めた見かけの拡散係数を用い、中性化深さ進行値をシフトした位置で、シミュレーション計算する方法を提案する。

参考文献

- 1) 青山實伸, 石川裕一, 足立嘉文, 西尾守広: 北陸地方での道路構造物の中性化深さの進行特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 32, No. 1, pp. 635-640, 2010.7
- 2) 小林一輔: コンクリート構造物の早期劣化と耐久性診断, 森北出版社, p. 144, 1991.7
- 3) 青山實伸, 石川裕一, 武内道雄, 川村満紀: 中性化の進行した道路構造物の塩化物イオン浸透特性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 809-814, 2011.7
- 4) 青山實伸, 有馬直秀, 北川勝明, 川村満紀: 中性化部分における塩化物イオン移動メカニズムに関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol. 35, No. 1, pp. 817-822, 2013.7
- 5) 青山實伸, 松田哲夫: 凍結防止剤によるコンクリート構造物への塩分浸透性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.807-812, 2004.7