

# 論文 中性化の進行した実道路構造物の塩化物イオン浸透特性

青山 實伸<sup>\*1</sup>・石川 裕一<sup>\*2</sup>・武内 道雄<sup>\*3</sup>・川村 満紀<sup>\*4</sup>

要旨：中性化の進行した道路構造物の凍結防止剤によるコンクリート中の塩化物イオン濃度分布は、中性化している表層部より深部の塩化物イオン濃度が大きい場合がある。特に劣化した鋼橋 RC 床版では、その傾向が顕著に示されている。この事象を検証するため、取替えられた鋼橋旧 RC 床版から採取した試験体を用い、SEM の反射電子像の画像解析による粗大細孔径分布の検討や塩分浸透促進試験を行った。その結果、粗大空隙量は中性化によって減少し、中性化深さが大きいほど塩化物イオンが浸透しにくくなっていた。また、中性化領域に浸透した塩化物イオンは、自然条件下で短期間に未中性化領域に移動することが明らかになった。  
 キーワード：塩害、中性化、内部空隙、塩化物イオン浸透、塩化物イオンの移動

## 1. はじめに

長年供用された道路構造物では、鋼橋床版や RC 中空床版橋で、中性化が大きく進行している<sup>1)</sup>。また、凍結防止剤 (NaCl) を含む路面水が付着する道路構造物の部位では、塩化物イオンのコンクリート中への浸透による塩害が発生している<sup>2)</sup>。凍結防止剤が散布される地域の鋼橋 RC 床版の疲労劣化の進行した部位では、ひび割れを通して塩化物イオンを含む路面水が床版下面に滲み出して拡がり、塩化物イオンがコンクリート中に浸透し鉄筋付近の濃度が大きくなり塩害を発生させている<sup>3)</sup>。

除塩していない海砂などを用いて内部に塩化物イオンを含むコンクリートは、中性化により塩化物イオンを固定化しているフリーデル氏塩が分解し塩化物イオンを解離し、未中性化部分に移動・濃縮し、鉄筋の腐食に影響を及ぼすことが知られている<sup>4)</sup>。しかし、海砂を使用していない場合でも、中性化の進行した道路構造物での塩化物イオン濃度分布は、中性化した表面部より深部の方で塩化物イオン濃度が大きくなっている場合がある。特に、凍結防止剤が散布される環境下で疲労劣化した鋼橋 RC 床版では、塩化物イオンが未中性化領域へ移動する現象が顕著に示され、中性化と塩化物イオンの浸入の複合によって鉄筋腐食が発生している場合がある。

本研究では、疲労劣化により取替えられた鋼橋旧 RC 床版 (以下、旧 RC 床版) 部位より採取したコンクリートコアを用いて、長年の間に表層部が中性化したと考えられるコンクリート中の塩化物イオン濃度分布を明らかにするとともに、コンクリート研磨面の走査電子顕微鏡 (SEM) の反射電子像 (BEI) の画像解析によって粗大細孔量を評価する。さらに塩化物イオンの浸透していない旧 RC 床版部位のコンクリートコアに対して塩分浸透促

進試験を実施し、中性化深さの進行による塩化物イオンの浸透度の違いや、それらコンクリートコアを屋外曝露試験に供したときの塩化物イオンの移動の特徴について検討する。

## 2. 道路構造物の塩化物イオン浸透状況

### 2.1 道路構造物の部位

建設から 26~36 年経過している北陸地方の高速道路の約 480 箇所、径 30 mm のコアを採取して中性化深さを測定した。さらに、凍結防止剤による塩化物イオンの浸透が懸念される 100 箇所について、コアを深さ方向 (0~20, 20~40, 40~60, 60~80mm) にスライスカットして塩化物イオン濃度を JIS A1154 の電位差滴定法により測定した<sup>1)</sup>。その中で、塩化物イオン濃度の測定値が 1kg/m<sup>3</sup> を超える 38 箇所について、構造部位ごとの塩化物イオン濃度分布のタイプを、表層部 (0~20mm) の濃度と深部 (20~40mm) の濃度の大小関係で分類し、表 - 1 に示す。深部の塩化物イオン濃度が表層部より大きいタイプが 45% を占めている。中性化深さが大きい上部工 RC 部位や橋台・橋脚では、深部の濃度が大きい傾向にある。一方、雨水に洗われ中性化深さの小さい壁高欄は、全て表層部の濃度が大きくなっている。中性化深さと表

表 - 1 構造部位ごとの塩化物イオン濃度分布のタイプ

構造部位	表層部>深部	表層部<深部	計
上部工 RC 部位	2	4	6
上部工 PC 部位	7	3	10
壁高欄	7	0	7
橋台・橋脚	4	8	12
C-Bx	1	2	3
計	21	17	38

\*1 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 部長 博(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 (正会員)

\*3 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 (株) 金沢支店 敦賀道路事務所 (正会員)

\*4 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 (株) 金沢支店 特別技術顧問 工学博士 (名誉会員)

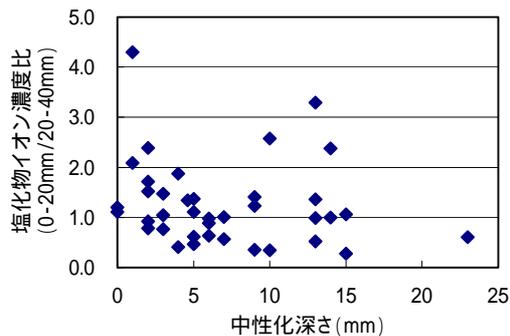


図 - 1 中性化深さと表層部と深部の塩化物イオン濃度比の関係

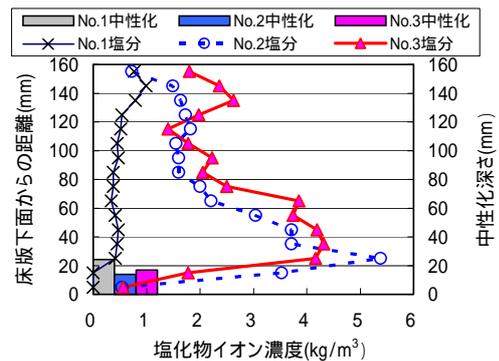


図 - 2 鋼橋 RC 床版での塩化物イオン濃度分布の事例

表 - 2 コンクリートの示方配合

f <sub>ck</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	スラップ (cm)	G <sub>max</sub> (mm)	空気量 (%)	W/C (%)	単位重量(kg/m <sup>3</sup> )				
					W	C	S	G	AE 減水剤
24	12	25	5.0	50	150	300	718	1185	0.75

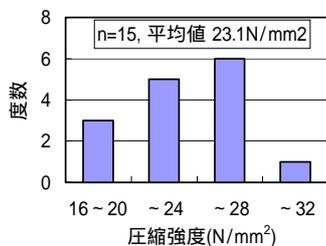


図 - 3 圧縮強度の分布

層部と深部との塩化物イオン濃度比の関係を図 - 1 に示す。中性化深さが数 mm 程度では表層部の濃度が大きいのが大部分であるが、それを越えると深部の濃度が大きい場合が生じている。

## 2.2 鋼橋 RC 床版の部位

次章に示す凍結防止剤が散布される地域の 35 年経過し疲労劣化が進行した旧 RC 床版で調査した塩化物イオン濃度分布の事例を図 - 2 に示す。調査は、劣化進行の異なる位置から床版下面よりひび割れを避け、径 55mm の貫通コアを採取し 10mm 厚でスライスカットして JIS A1154 の電位差滴定法により塩化物イオン濃度を測定した。No.1, No.2, No.3 コアの中性化深さは、それぞれ 24, 14, 17mm であり、コア近傍の床版下面のひび割れ密度は、5~8m/m<sup>2</sup> である。コアの塩化物イオン濃度は、No.1 は小さいが No.2, No.3 は大きく床版下面から 20~60mm の深さで塩化物イオン濃度が高くなっている。塩化物イオン濃度は、いずれのコアも未中性化領域の方が中性化している表層部より大きい。疲労劣化した鋼橋 RC 床版では、床版上面やひび割れから塩化物イオンが床版内部へ浸透すると共に、塩化物イオンを含む路面水がひび割れを通して床版下面にしみ出して下面に拡がり、床版下面より浸透する<sup>3)</sup>。その際、床版下側の塩化物イオン濃度は、未中性化領域の方が中性化している表層部より大

きくなっており、浸透した塩分が深部へ移動していると推察される。旧 RC 床版の鉄筋かぶり厚は 30mm であり、No.2, No.3 では鉄筋位置で鋼材腐食発生限界濃度とされる 1.2kg/m<sup>3</sup> を大きく上回っている。実際の鉄筋には、はつきり調査の結果、腐食が発生していた。

## 3. 旧 RC 床版を用いた塩分浸透性試験

### 3.1 旧 RC 床版の劣化と促進試験用コアの概要

#### (1) 旧 RC 床版の劣化概要

旧 RC 床版は、主桁間隔 3m、床版厚 210mm、コンクリートの設計基準強度は 24N/mm<sup>2</sup> で、表 - 2 に示す示方配合により施工されている。

旧 RC 床版では、劣化状況を把握するために、圧縮強度、塩化物イオン濃度分布、中性化深さ分布を調査した。圧縮強度は、劣化進行の異なる位置から径 55mm の貫通コア 15 本を採取して JIS A 1107 に準じて実施した。圧縮強度の分布を、図 - 3 に示す。圧縮強度は 17~30N/mm<sup>2</sup> に分布し、設計基準強度を下回る箇所が多くあり、疲労劣化に起因していると考えられる。圧縮試験後に同じコアを用い塩化物イオン濃度を測定し、その結果の一部を図 - 2 に示した。床版下面付近で塩化物イオン濃度が確認されたコアは 13 本あり、1kg/m<sup>3</sup> 以上の濃度が測定されたコアが 6 本あった。床版下面付近で塩化物イオン濃度が確認されたコアの塩化物イオン濃度分布は、図 - 2 に示したように中性化領域で小さくなっている。床版下面の中性化深さは、旧 RC 床版の 6 箇所の切断面（ハンチ部を除く 1.9m 間）にて 100mm 幅ごとに測定した。中性化深さの平均値は 24.2mm で、変動係数は 0.21 である<sup>5)</sup>。

#### (2) 促進試験用コアの概要

促進試験用コアは、ひび割れの少なく塩化物イオンの浸透が認められない旧 RC 床版の路肩側主桁間（約 1.5

×0.4m の範囲)より、径 90mm の貫通コアを採取し、中性化深さ(平均値,最大値)を測定した。コアは、コンクリートの粗大細孔径分布を得るための画像解析用と、塩分浸透促進試験の試験体に用いた。

### 3.2 走査電子顕微鏡(SEM)BEI 画像解析<sup>6)</sup>

#### (1) SEM 用試料の作製

試料は、中性化領域ではコア表面より深さ 5mm、未中性化領域ではコア表面より深さ 70mm の位置で、それぞれ切断面中央部から切り出した。その後、傾斜溶媒置換により内部水分を除去し、さらに t-ブチルアルコールによる傾斜置換を行った。次に、真空樹脂含浸装置を用いて水分を十分に除去した後、エポキシ樹脂を含浸させ、耐水研磨紙およびダイヤモンドスラリーを用い研磨し、金-パラジウム蒸着を行い SEM 用試料とした。

#### (2) BEI 画像解析

走査電子顕微鏡を用いて、観測倍率 500 倍で無作為に 10 枚の BEI 画像を取得した。このとき、1 画像は 1,148 × 1,000 画素からなり、1 画素は 0.221 μm に相当する。取得した画像に対し、グレースケールに基づき 2 値化処理を行い粗大細孔のみを抽出した 2 値化画像を得た。

### 3.3 塩分浸透促進試験および自然曝露試験

#### (1) 試験体の作製

塩分浸透促進試験は、表層部が中性化した場合と未中性化の場合との塩分浸透性の違いを明らかにするために、表-3 に示す種類を実施した。塩分浸透性を比較する試験ケース A、B の試験体の作製は、図-4 に示すように、旧 RC 床版の厚さ方向に貫通して採取したコアを長さ方向に二等分し、中性化面(床版下面)と未中性化面(切断面)を曝露面にし、残りの面はエポキシ樹脂で塗装した。塩分浸透促進試験後は、試験体のコア断面を 2 分割し、片方で塩化物イオン濃度分布を測定し、残り片方は分割面にエポキシ樹脂塗装を行い、塩分移動性を比較するための自然曝露試験体とした。試験ケース A、B の試験体は、それぞれ 6 体作製した。

塩分浸透性試験では、中性化領域と未中性化領域との両者間の境界領域の違いを比較するため、同一コア内から図-5 に示す試験ケース C の試験体を作製した。試験体は、中性化深さの大きいコアを使用し 3 体作製した。これらの試験体では、中性化領域と未中性化領域との境界領域の 1 面を曝露面とし、他の切断面はエポキシ樹脂で塗装を行った。

#### (2) 塩分浸透促進試験の方法

塩分浸透促進試験では、複合サイクル試験機を用いて試験体に多くの塩分を浸透させることができる次に示す条件で、塩水噴霧乾湿繰り返しに曝した。

- ・噴霧サイクル：1日噴霧 6日乾燥で 7日 1 サイクル
- ・環境条件：温度 40 ，乾燥時湿度 60%

表-3 塩分浸透促進試験の種類

種類	着目点	試験体作成方法	曝露面	
浸透性試験 ケース	A	中性化領域	コア長 1/2 切断	中性化面
	B	未中性化領域	同上	切断面
	C	両領域境界面	コア内で作成	切断面
自然曝露試験	浸透性試験後自然曝露による塩分移動性	ケース A、B の塩分浸透後に試験体断面を 2 分割	中性化面 & 切断面	

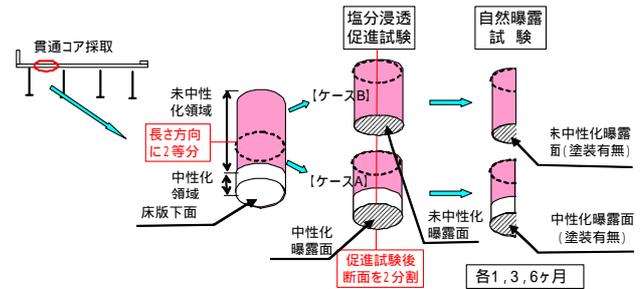


図-4 塩分浸透性試験ケース A、B の試験体

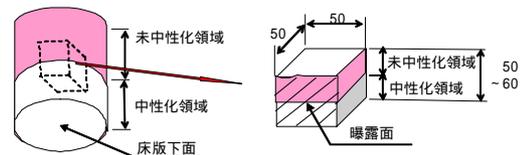


図-5 塩分浸透性試験ケース C の試験体

- ・噴霧塩分：3.5%の食塩水をミスト状に散布

噴霧期間は、凍結防止剤による塩化物イオンの浸透を勘案して、試験ケース A、B では約 2 ヶ月(56 日間)とし、試験ケース C では試験体が小さく、塩分浸透の差を明確にするため約 1 ヶ月(28 日間)とした。

#### (3) 自然曝露試験

自然条件下の塩分移動性を比較するための自然曝露試験のパターンを表-4 に示す。自然曝露試験は、曝露面を中性化面と未中性化面の 2 種類とし、それぞれの曝露面に塗装(エポキシ樹脂)の有無による組み合わせで 4 パターンとした。塗装は、外部環境の影響を遮断した場合の影響を把握するものである。試験体は、海岸から離れた雨水に洗われる屋外(石川県金沢市)に設置し、各試験体の曝露期間は各々 1, 3, 6 ヶ月間とした。

#### (4) 塩化物イオン濃度測定

塩分浸透性と移動性を比較する試験ケース A、B の試験体は、塩分浸透促進試験および自然曝露試験終了後、直ちに深さ方向 5mm 間隔でスライスカットし、各スライス中の塩化物イオン濃度を測定した。中性化と未中性化との境界領域の塩分浸透性を比較する試験ケース C の試験体は、図-5 に示す試験体の上端と下端を厚さ 10mm で、曝露面より深さ方向 10mm ごとに立方体試料を切り出し、塩化物イオン濃度を測定した。塩化物イオン濃度の測定は、JIS A1154 の電位差滴定法により行った。

### 3.4 試験結果と考察

#### (1) 走査電子顕微鏡 BEI 画像解析による粗大細孔径分布の評価

BEI 画像解析によって得られた中性化領域と未中性化領域の粗大細孔径分布を図 - 6 に示す。この図から、中性化によって粒径  $7\mu\text{m}$  以下の空隙率が大きく低下していることがわかる。中性化によって、炭酸カルシウムの析出により空隙が充填されたと考えられる。中性化による空隙率の減少は、BEI 画像解析よりも小さい範囲の細孔径を評価する水銀圧入法によっても確認されている<sup>7)</sup>。

#### (2) 塩分浸透性

試験ケース A, B の塩分浸透性を比較するための塩分促進試験において、試験終了後の試験体中の塩化物イオン濃度の分布状況を図 - 7, 図 - 8 に示す。なお、図中には、自然曝露による移動性試験の結果も併せて示している。図より、曝露面が中性化している場合は、表面付近の塩化物イオン濃度は  $4\text{ kg/m}^3$  程度であり、深さ方向に  $50\text{ mm}$  程度まで塩化物イオンが浸透している。他方、曝露面が未中性化の場合は、表面付近の塩化物イオン濃度は  $7\sim 9\text{ kg/m}^3$  であり、深さ方向に  $70\text{ mm}$  程度まで浸透しており、中性化した試験体に比べ浸透量は大きいことがわかる。

塩分浸透促進試験後の塩化物イオン濃度分布から、塩

表 - 4 自然曝露試験のパターン

曝露面の状態		試験体 No.および曝露期間
中性化	塗装	
有	有	No.1(1ヶ月), No.2(3ヶ月), No.3(6ヶ月)
有	無	No.4(1ヶ月), No.5(3ヶ月), No.6(6ヶ月)
無	有	No.7(1ヶ月), No.8(3ヶ月), No.9(6ヶ月)
無	無	No.10(1ヶ月), No.11(3ヶ月), No.12(6ヶ月)

化物イオン浸透総量(表面から深さ  $100\text{ mm}$  までの各深さの塩化物イオン濃度( $\text{kg/m}^3$ )に各厚さ( $\text{mm}$ )を乗じた値の合計値)を求め、中性化深さと塩化物イオン浸透総量との関係を図 - 9 に示す。図より、中性化深さが大きくなるのに従い、浸透塩分総量は小さくなり、塩化物イオンが浸透しにくくなることが示される。これは、中性化深さが大きくなるほど、粗大空隙量の小さい(緻密な)領域が拡大し、塩化物イオンが浸透しにくくなることによると考える。図 - 10 は、水セメント比の異なるコンクリート試験体を 4 ヶ月間塩分浸透促進試験(本試験と同一の環境条件)に供した場合の結果<sup>8)</sup>と、親不知海岸高架橋の自然環境に 20 年間曝露したコンクリート供試体の塩化物イオン浸透総量<sup>9)</sup>を示す。この図では、同じ塩害環境であっても、水セメント比が小さくなるに従い塩化物イオンが浸透しにくくなることを示している。図 - 9, 図 - 10 より、中性化深さが  $20\text{ mm}$  程度の塩分浸透性は、水セメント比  $40\%$  程度のコンクリートの塩分浸透性と同程度であると推察される。このことは、中性化深さが大きくなるほど、塩化物イオンの見掛けの拡散係数が小さくなることを示している。

中性化と未中性化領域との境界領域の塩分浸透性を

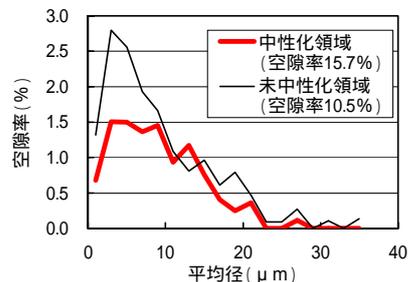


図 - 6 粗大細孔径ごとの空隙率の分布

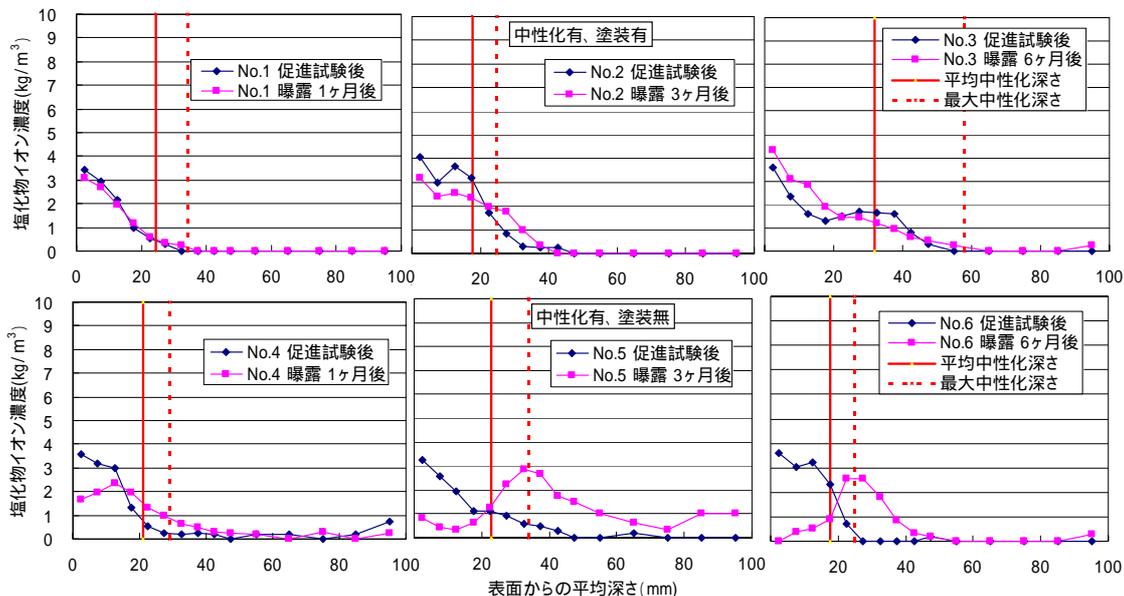


図 - 7 曝露面が中性化している場合の塩分促進浸透試験後と自然曝露後の塩化物イオン濃度分布

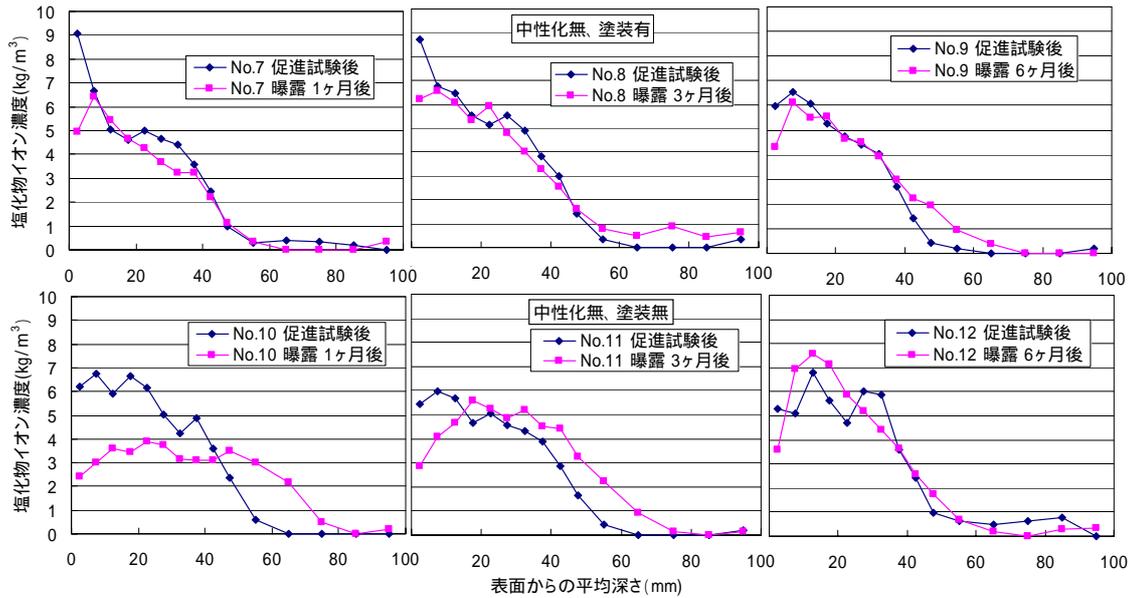


図 - 8 曝露面が未中性化の場合の塩分促進浸透試験後と自然曝露後の塩化物イオン濃度分布

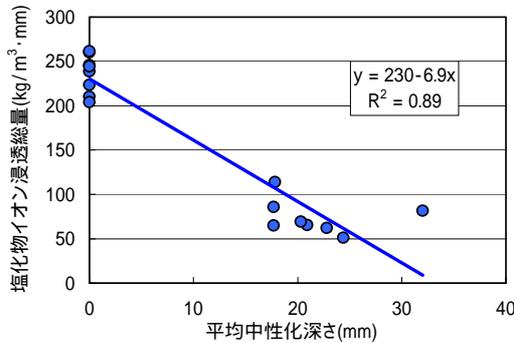


図 - 9 中性化深さと塩化物イオン浸透総量との関係

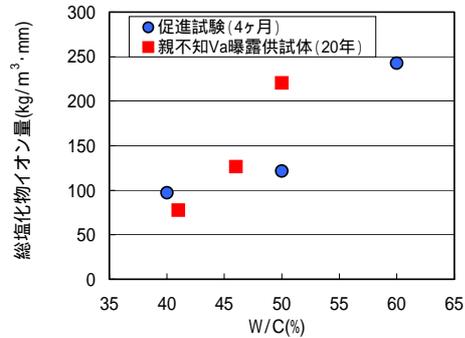


図 - 10 水セメント比と塩化物イオン浸透総量との関係

比較するための試験ケースCの試験体の塩化物イオン濃度分布を図 - 11 に示す。中性化と未中性化領域との境界領域の塩分浸透性は、試験ケース A, B の結果と同じ傾向を示している。同じコア内の中性化領域と未中性化領域との境界領域でも、塩分浸透性が明らかに異なることを示す。

### (3) 塩分移動性

中性化および未中性化試験体の塩分浸透促進試験後の自然曝露試験において、曝露期間 1, 3, 6 ヶ月における各試験体の曝露面の塗装の有無による塩化物イオン濃度分布の相違を、それぞれ図 - 7, 図 - 8 に示す。図 - 7 より、中性化した無塗装状態の試験体 (No.4, No.5, No.6) は、曝露期間 3 ヶ月でほとんどの塩化物イオンが中性化領域に移動している。曝露期間 3 ヶ月から 6 ヶ月の間で、表層部の塩化物イオン濃度は小さくなっているものの、塩化物イオン濃度分布にあまり大きな変化はなく、塩化物イオン濃度分布のピークは最大中性化深さ付近にある。一方、曝露面に塗装を行った場合、中性化した試験体 (No.1, No.2, No.3) は、塩化物イオン濃度分布の曝露期間中の変化は小さい。この違いは、表層部の

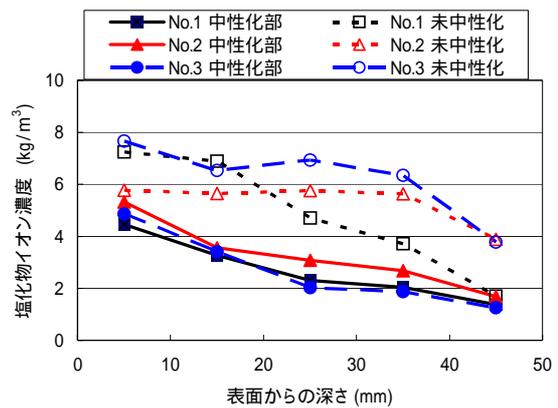


図 - 11 境界領域での塩化物イオン濃度分布

乾湿繰り返しの影響の有無にある。中性化によって表層部は、微視的には組織は緻密になっているが、長年の間に繰り返しの荷重、乾湿の繰り返し、温度変化の繰り返しの影響を受けて、コンクリート中に準マクロなレベルで欠陥 (骨材粒子の周りなどの微視ひび割れ) がある程度の数生じている可能性が想定される。このような条件の下で、屋外曝露の乾湿繰り返し過程で、初期の一時期 (3 ヶ月以内) に毛細管現象により塩水が急速に深部に向かって

移動したと考える。図 - 8 より、未中性化面に塗装した試験体 (No.7, No.8, No.9) は、塩化物イオン濃度分布の曝露期間中の変化は小さい。未中性化の状態の試験体 (No.10, No.11, No.12) は、表層部の塩分が低下する傾向を示すが、No.12 での深部への移動は小さい。No.10, No.11 の塩化物イオン濃度分布に大きな差があるのは、試験体間の内部ひび割れ等の差異の影響を受けた可能性が考えられる。曝露面に塗装を行った試験体や未中性化の試験体では、塩化物イオンの移動は細孔溶液を通しての拡散によると考えられるので塩化物イオン濃度分布の変化が小さくなったと推察される。また、未中性化の試験体の表層部の塩分の低下の一部分は、外部への漏出によるものと考えられる。

#### 4. 中性化の進行した部材の塩分浸透特性

中性化の進行した部材は、中性化によってコンクリートの内部構造が緻密化し塩化物イオンが浸透しにくくなり、中性化深さが大きくなるほど塩化物イオンの見掛けの拡散係数は小さくなる。中性化した領域に塩化物イオンが浸透すると、乾湿繰り返し過程で、短期間に毛細管現象により塩水が内部の未中性化領域に移動し、未中性化領域の塩化物イオン濃度は中性化している表層部より大きくなる。このことは、中性化による内在塩分の移動・濃縮現象と似た事象が生じることを意味する。

凍結防止剤による塩害では、塩分の供給は冬期に限られる。凍結防止剤の塩害環境下にある中性化の進行している鋼橋 RC 床版では、疲労劣化が進行しひび割れを通して冬期間に供給される塩分が床版下面に滲み出して拡がる状況になると、浸透した塩化物イオンは、その後短期間に床版下面の未中性化領域に移動する。この結果、床版下面の鉄筋付近の塩化物イオン濃度は高くなり、鉄筋腐食による塩害劣化が急速に進行することになる。

道路構造物の塩害調査では、中性化深さを把握し、中性化に伴う塩化物イオンの拡散係数の変化や、未中性化領域への塩分の移動現象に着目することが重要である。

#### 5. まとめ

中性化した道路構造物部位の塩化物イオン浸透特性についての研究結果をまとめると次のようである。

- (1) 中性化深さが大きい上部工 RC 部位や橋台・橋脚では、深部の塩化物イオン濃度が大きい傾向にある。
- (2) 凍結防止剤が散布される地域の疲労劣化した鋼橋 RC 床版では、未中性化領域に塩化物イオンが移動し、鉄筋腐食を生じていることがある。
- (3) 中性化領域の空隙率は、未中性化領域に比べ、かなり小さくなり緻密になっている。
- (4) 中性化深さが大きくなるほど塩化物イオンは浸透

しにくくなり、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は小さくなる。

- (5) 中性化した表層部に塩化物イオンが浸透すると、自然曝露条件下の乾湿繰り返し過程で、短期間に毛細管現象により塩水が深部に移動し、未中性化領域の塩化物イオン濃度は中性化している表層部より大きくなる。この事象により、中性化の進行した鋼橋 RC 床版では、疲労劣化が進行して塩分が床版下面に滲み出して拡がった場合、浸透した塩分は短期間に未中性化領域に移動し、塩害劣化が急速に進行することになる。

謝辞 反射電子画像による中性化に伴う粗大空隙の変化に関する評価は、金沢大学 五十嵐 心一 教授に実施していただきました。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 青山 實伸, 石川 裕一, 足立 嘉文, 西尾 守弘: 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) 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特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.807-812, 2004.7
- 3) 石川 裕一, 青山 實伸, 倉戸 伸浩, 西尾 守弘: 劣化した道路鋼橋 RC 床版の凍結防止剤による塩分浸透特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1393-1398, 2010.7
- 4) 小林 一輔: コンクリートの炭酸化に関する研究, 土木学会論文集, No.433/V-15, pp.1-14, 1991.8
- 5) 青山 實伸, 石川 裕一, 川原 和弘: コアによる実構造物での中性化深さ測定方法に関する考察, 土木学会第 65 回年次学術講演会, pp.757-758, 2010.9
- 6) 白上 新, 石川 裕一, Dang Giang Hoang, 五十嵐 心一: 実コンクリート構造物から採取したコンクリートコア画像の空間統計学的調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1673-1678, 2010.7
- 7) 佐伯 竜彦, 大賀 宏行, 長滝 重義: コンクリートの中性化の機構解明と進行予測, 土木学会論文集, No.414/V-12, pp.99-108, 1990.2
- 8) 武内 道雄, 渡辺 暁央, 青山 實伸, 宮里 心一: 各種材料・配合の浸透塩分総量および表面塩分量の評価, 土木学会第 62 回年次学術講演会, pp.993-994, 2007.9
- 9) 齋藤 正司, 渡辺 二夫, 青山 實伸, 武内 道雄: 塩害環境下のコンクリート橋に適用した各種表面被覆の 20 年目の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.771-776, 2008.7