

論文 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

青山 實伸^{*1}・松田 哲夫^{*2}

要旨：積雪寒冷地域では，冬期路面の安全性確保のため凍結防止剤（主成分 NaCl）が路面に散布される。凍結防止剤中の塩分を含む路面水は，走行車両による飛散や橋梁伸縮装置の漏水等により，コンクリート構造物表面に付着し浸透する。本論文では，凍結防止剤によるコンクリート構造物への塩分浸透事例を示し，塩分濃度分布よりを算定される表面塩化物イオン濃度および拡散係数の分布状況を分析し，塩分浸透の特徴と性状を明らかにする。

キーワード：塩害，凍結防止剤，表面塩化物イオン濃度，見掛けの拡散係数，劣化予測

1. はじめに

積雪寒冷地域では，冬期間の円滑な道路交通を確保するために，除雪や凍結防止剤の散布が実施される。凍結防止剤の散布は，その塩化物（主成分 NaCl）溶液の氷点を降下させる性質を利用し，路面水分の凍結を防止し路面のすべり抵抗を確保することを目的としている。

凍結防止剤中の塩分は路面水に溶け，走行車両のタイヤにより路面水が飛散してコンクリート構造物表面に付着し浸透する。また，伸縮装置部の漏水個所では，塩分を含む路面水がコンクリート表面を湿潤状態にし塩分を浸透させる。浸透する塩分量の程度は，凍結防止剤の散布量やコンクリート構造物の構造・部位等により異なると想定される。

本論文は，凍結防止剤によるコンクリート構造物への塩分浸透事例を示すとともに，RC 中空床版橋の伸縮装置周辺部で多くの塩分濃度分布を調査し，表面塩化物イオン濃度および拡散係数を算定し，凍結防止剤の塩分浸透状況や塩分浸透性状を分析したものである。

2. 凍結防止剤散布と構造物への影響

2.1 凍結防止剤の散布

凍結防止剤は，1 回あたり 20 ~ 30 g/m² (NaCl 量) が散布される。凍結防止剤が散布された路

面水の塩分濃度は，散布直後に 5 ~ 6% 程度になる。その後，降雪や路肩側からの浸み出し水により希釈されて流出するとともに通行車両によって飛散し，塩分濃度が低下する。塩分濃度が 1 ~ 2% になると追加散布が行われ，散布は通常 4 ~ 6 時間間隔で実施されることが多い。

北陸地方の高速道路での凍結防止剤の 1 km あたりの年間使用量の推移を図-1 に示す。凍結防止剤の使用量は，冬期気象の影響を受け，概ね冬日日数で決定される。

2.2 コンクリート構造物への浸透メカニズム

路面に散布された凍結防止剤は，路面水および降雪や路肩堆雪に混じって融雪水として大部分が水路等を通して流出し，一部が走行車両により路面近傍および大気中に飛散すると推定さ

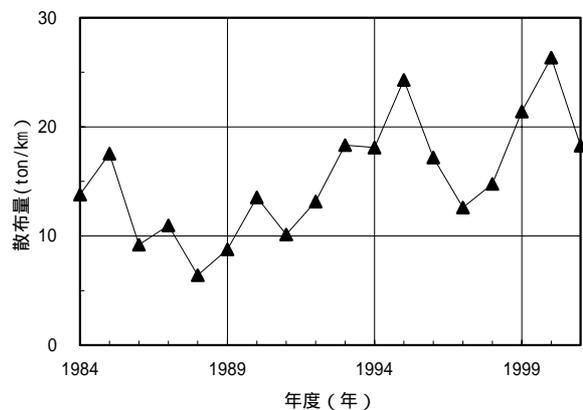


図-1 北陸自動車での凍結防止剤散布量推移

*1 (株)クレストエンジニア 土木調査設計部長 (正会員)

*2 日本道路公団 北陸支社 金沢技術事務所所長 工修

れる¹⁾。路面水の流出の過程では、一部は伸縮装置部から漏水し、上部工端部や下部工のコンクリート構造物表面が湿潤状態になり塩分が付着する。また、凍結防止剤の混じった路肩に堆積した雪堤の融雪水の一部は、橋梁地覆部や壁高欄部を伝って床版張出部や水切部が湿潤状態になり塩分が付着する。トンネル内では、路面水が通行車両により水飛沫や飛沫状に飛散しコンクリート壁面に付着する。付着した塩分は、コンクリート中に浸透し、鉄筋位置で鋼材腐食発生限界濃度²⁾に達すると鉄筋腐食を進行させ腐食生成物(錆)が膨張し、塩害損傷を発生させることとなる。降雨や降雪により洗い流される部位では、付着する塩分量が減り塩分浸透が少なくなると考えられる。なお、凍結防止剤の大気中に飛散する塩分は少なく¹⁾、海岸部の飛沫塩分による塩害のようにコンクリート構造物全体に影響を及ぼすことはないと推察される。

2.3 塩分浸透状況の事例

道路構造物への塩分浸透状況の事例として、1)伸縮装置部の漏水の影響を受けたRC中空床版端部、2)張出床版下面の水切部、3)トンネル壁面、を取り上げ凍結防止剤による塩分浸透の特徴を考察する。

(1) RC 中空床版端部

凍結防止剤の年間平均使用量 18 ton / km 区間での供用後 22 年経過した伸縮装置部周辺の RC 中空床版(設計基準強度 24 N/mm²)下面で、コンクリート表面部の塩分濃度の面的な分布状況を調査するため、伸縮装置から 5 m の範囲を 1 m メッシュでコンクリート表面部(0~10 mm)の塩分濃度を測定した。塩分濃度測定は、コンクリートカッターで 30×30×10 mm のブロックの試料を採取し、JCI-SC4 の試験方法(2 規定の硝酸での溶解)に従い電位差滴定法により全塩化物イオン濃度を分析した。

表面部(0~10 mm)の塩分濃度(塩化物イオン濃度として)の分布状況を図-2 に示す。表面部の塩分濃度の大きい値を示す位置は漏水範囲とほぼ一致している。塩分浸透の影響は橋脚端

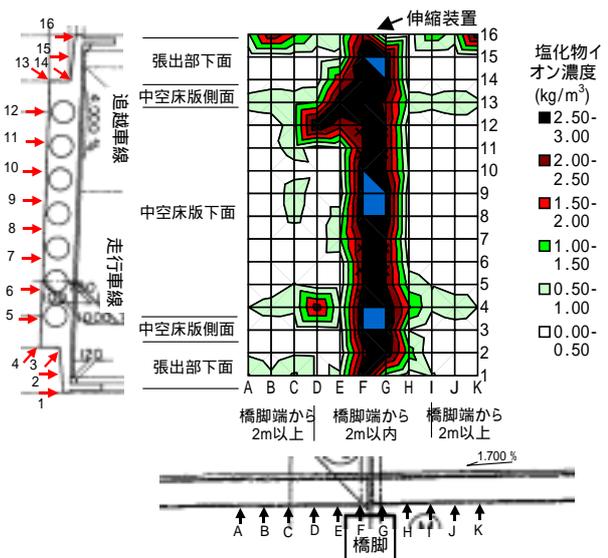


図-2 RC 中空床版端部の伸縮装置部周辺での表面部の塩分濃度分布

部から 1m 程度であるが、部分的に最急勾配の方向に 3 m 程度まで影響している。端部から離れた箇所での塩分浸透は僅かであり、大気中に飛散した塩分による影響が小さいことを実証している。張出部下面では、水切部周辺で部分的に融雪水の影響を受けた箇所では塩分浸透が確認できる。

(2) 張出床版下面の水切部

凍結防止剤の年間平均使用量 18 ton / km 区間での供用後 22 年経過した RC 中空床版(設計基準強度 24 N/mm²)の張出部下面とウエブのコンクリート表面部(0~20 mm)の塩分濃度の横断方向の変化を測定した。塩分濃度測定は、ドリル法(径 20 mm)により近傍 3 点から試料を採取し、JCI-SC4 により全塩化物イオン濃度を分析した。

張出部下面とウエブの表面部の塩分濃度は、図-3 に示すような分布状況になる。塩分浸透は、張出端部より 100~500 mm 程度の範囲で認められ、多い位置では 6 kg/m³ を越える塩分が浸透している。一方、端部より離れた下面やウエブでは塩分浸透が僅かである。壁高欄や地覆を伝った雨水や融雪水は、張出部端部より 100 mm の位置に設置された水切(逆 V 断面で深さ約 15 mm)で落下する構造となっている。しかし、雨水や融雪水が多い場合や水切形状に不備がある

場合には、水切部を越えて張出下面に融雪水等が滲み出す場合があります、結果として塩分が浸透したものと推察される。

(3) トンネル壁面

凍結防止剤の年間平均使用量 37ton / km 区間での供用後 14 年経過した RC カルバートボックス構造(設計基準強度 24 N/mm²)のトンネル側壁および天井で、路面からの高さの違いによる塩分濃度分布を測定した。塩分濃度測定は、ドリル法(径 20 mm)により近傍 3 点から深さ方向 20 mm 毎に 100 mm 迄の試料を採取し、JCI-SC4 により全塩化物イオン濃度を分析した。

側壁および天井での塩分濃度分布の状況を図-4 に示す。浸透塩分量は、路面水が通行車両により常時跳ねると想定される高さ0.6mの高さで最も大きく、表面部の塩化物イオン量は8 kg/m³に達している。路面から高くなるに従い浸透塩分量は減少し、高さ4.2 mでは表面部の塩化物イオン量は4 kg/m³となっている。また、天井では表面部で1 kg/m³程度と少なく凍結防止剤の影響が大きく緩和されている。

3. 塩分浸透性の評価

3.1 評価方法

凍結防止剤による塩分浸透の事例の多い RC 中空床版の伸縮装置部周辺および水切部で塩分浸透状況の傾向を分析する。RC 中空床版橋は、北陸地方の高速道路の10~20 km 毎に供用後2~29 年経過した橋梁を中心に1橋ずつ選び、合計50 橋を評価の対象にした。調査した中空床版橋の設計基準強度は24 N/mm²である。塩分浸透の調査は、図-5 に示す橋台伸縮装置部周辺の位置で実施した。塩分濃度分布の調査位置は、中空床版端部ウェブで2 箇所(A 点・B 点)、伸縮装置部の漏水が影響しない位置での張出部水切部で2 箇所(C 点・D 点)、橋台の豎壁(パラペット)1 箇所(F 点)とした。水切部および主版ウェブ部の調査位置は、隅角部より100 mm 離れた地点で実施した。塩分濃度分布の測定は、ドリル法により2.3 (3) で示した方法と同様に実施した。

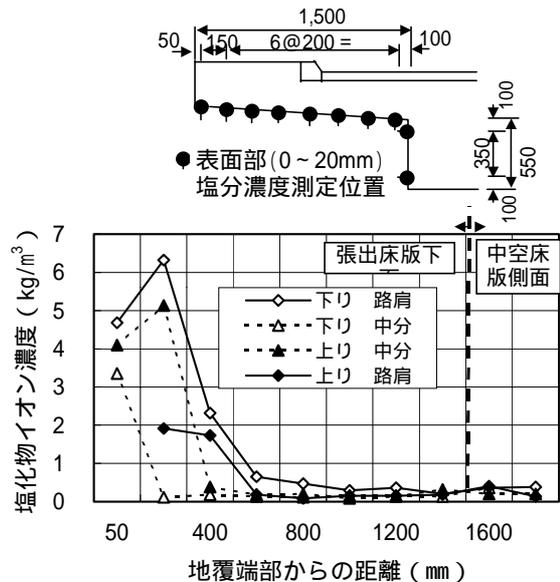


図-3 張出部下面の表面部の塩分濃度分布

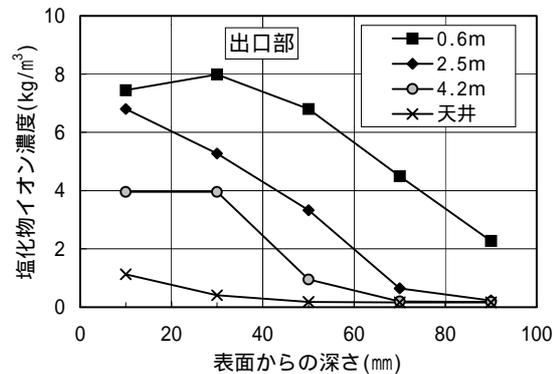


図-4 トンネル側壁での路面からの高さとの塩分濃度分布の関係

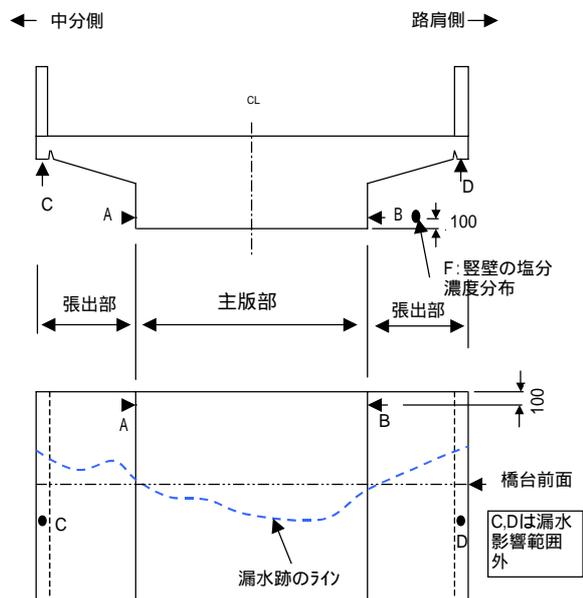


図-5 伸縮装置部周辺の調査位置

塩分浸透の分析は、橋梁の漏水状況や塩分浸透状況、漏水の有無や影響範囲、塩分浸透の程度や塩分浸透パターンについて実施する。さらに、フィックの拡散方程式を用いて、表面塩化物イオン濃度(C_0)および見掛けの拡散係数(D_c)を算定し²⁾、凍結防止剤の散布量、部位毎の塩分浸透性を比較する。

3.2 RC 中空床版橋での評価

(1) 漏水状況および塩分浸透状況

伸縮装置部の漏水は、88 %の橋梁において認められ、漏水の認められない橋梁のほとんどは経過年数10年未満である。伸縮装置の種類は、ほとんどがゴム系ジョイントである。伸縮装置部の桁端部主版での漏水の影響範囲を図-6に示す。伸縮装置部の主版の漏水影響範囲は、桁端部より1 m迄の場合が多い。しかし、縦断勾配と横断勾配との合成勾配が大きい場合は、一部の橋梁で最大3.5 mまで影響しているケースもある。漏水範囲には、凍結防止剤による塩分が浸透していると推測される。

塩分浸透の程度は、表面部(0~20 mm)の塩分濃度が 0.8 kg/m^3 未満の場合を浸透わずかとして区分すると図-7のようになる。図より部位別では、縦壁部で90 %、主版部で75 %、水切部で50 %が塩分浸透していると判定される。縦壁部で多くなり、主版部で少なくなる理由は、伸縮装置からの漏水が鉛直面を伝わった後にウェブに到達するために、主版面への影響が緩和されたことによるものである。

塩分浸透パターンは、塩分濃度分布の形状で図-8に示すような3タイプに分類した。タイプ

は、塩分がコンクリート表面で多く、深くなると減少する分布形状で、通常の海岸部構造物での塩分浸透に見られるものである。タイプは、表面部付近の塩分濃度が内部より減少する分布形状であり、塩分浸透履歴の影響やコンクリート表面の中性化に伴う塩分の移動現象³⁾に起因するものである。タイプは、表面の塩分濃度より、内部の塩分濃度がほぼ同じか、それより多い分布形状のものである。タイプ

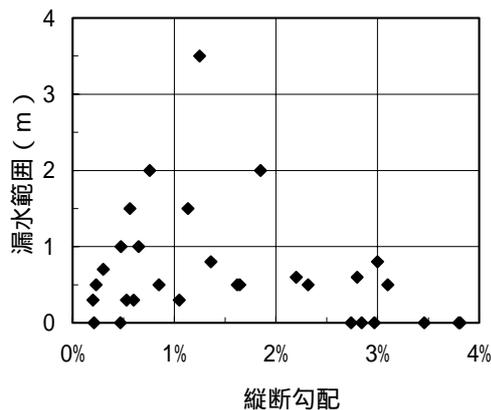
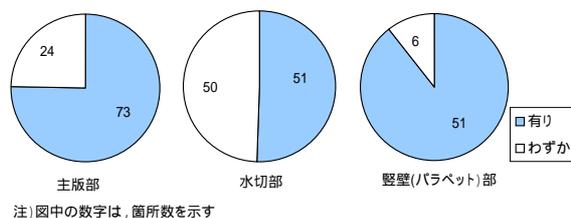


図-6 主版端部の漏水の影響範囲



注) 図中の数字は、箇所数を示す

図-7 部位毎の塩分浸透の程度

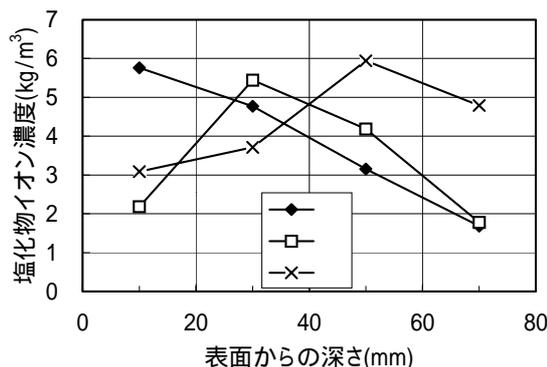
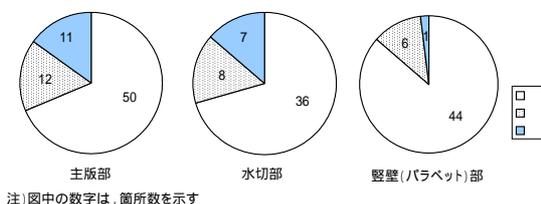


図-8 塩分濃度分布の形状



注) 図中の数字は、箇所数を示す

図-9 部位毎の塩分浸透パターンの構成

布形状を示す要因は、1) コンクリートの品質が不良、2) 鉄筋腐食による微細なクラック発生の影響、3) 調査箇所が水切部や主版ウェブ部のように部材隅角部のため2方向からの塩分浸透の影響を受ける、ことが考えられる。塩分浸透箇所での部位ごとの塩分浸透パターンの構成を図

- 9 に示す。タイプ は、豎壁部で86 %と最も多くなり、水切部で70 %と少ない。タイプ は、水切部や主版部で多く豎壁で少ない傾向にある。豎壁では、水切部や主版部より漏水の影響を受け易く、中性化の進行も抑制されることによるものと考えられる。タイプ は、水切部や主版部で15 %と多くなり、豎壁ではほとんど見られない。これは、隅角部でのコンクリートの品質不良、微細なクラックおよび 2 方向からの塩分浸透の影響によるものと推察される。

(2) 塩分浸透性

塩分浸透タイプ の各部位ごとの凍結防止剤散布量と Co 値の関係を図-10に示す。凍結防止剤散布量は、過去の年平均散布量より車道部の単位面積当りの塩化物イオン重量に換算して示している。図-11には、各部位ごとの供用後の経過年数と Co 値の関係を示す。凍結防止剤散布量および経過年数と Co 値の間には明確な関連性が認められない。これは、1 回に散布する単位面積当りの凍結防止剤量が大きく変化しないため、

漏水中の塩分濃度が同じ傾向を示すことに起因するものと推察される。 Co 値は、 15 kg/m^3 以下の範囲にあり、全部部位の平均は 3.8 kg/m^3 となる。各部位ごとの Co 値は、主版部で $1 \sim 15 \text{ kg/m}^3$ 、平均は 4.5 kg/m^3 で、水切部や豎壁部で $1 \sim 8 \text{ kg/m}^3$ 、平均値はそれぞれ 2.3 kg/m^3 、 4.55 kg/m^3 である。

塩分浸透タイプ での部位ごとの Co と Dc の関係を図-12 に示す。図には海岸部の橋梁(海岸橋略記)での算定結果の分布状況を合わせて示している⁴⁾。主版部での Dc 値は、 Co 値が小さい場合に海岸橋の分布範囲(平均値(m)+標準偏差(s))を上回る測定値と、海岸橋の平均値を下回る測定値が多く、平均 Dc は $3.1 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ となる。水切部では、 Co 値は 3 kg/m^3 未滿がほとんどで、 Dc 値はばらつきを有し海岸橋の分布上限範囲($m+s$)を上回る測定値が多く、平均 Dc 値は $3.4 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$ である。豎壁部の Dc 値は、海岸橋の分布と類似しているが海岸橋の分布下限範囲($m-s$)付近に多く分布し、平均 Dc 値は

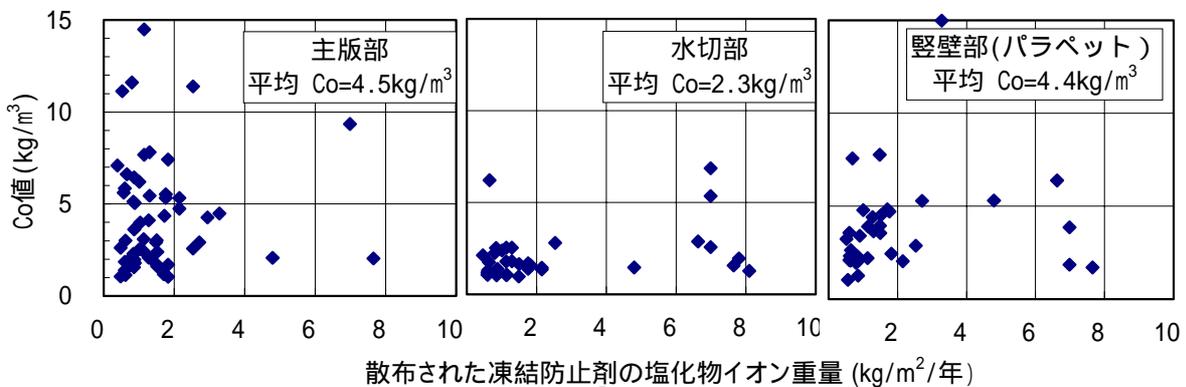


図-10 部位ごとの凍結防止剤散布量と Co 値の関係 (塩分浸透タイプ)

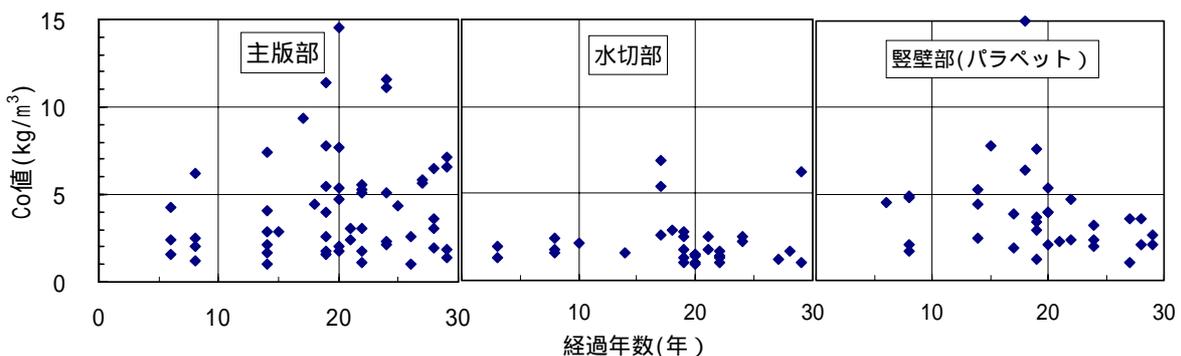


図-11 部位ごとの経過年数と Co 値の関係 (塩分浸透タイプ)

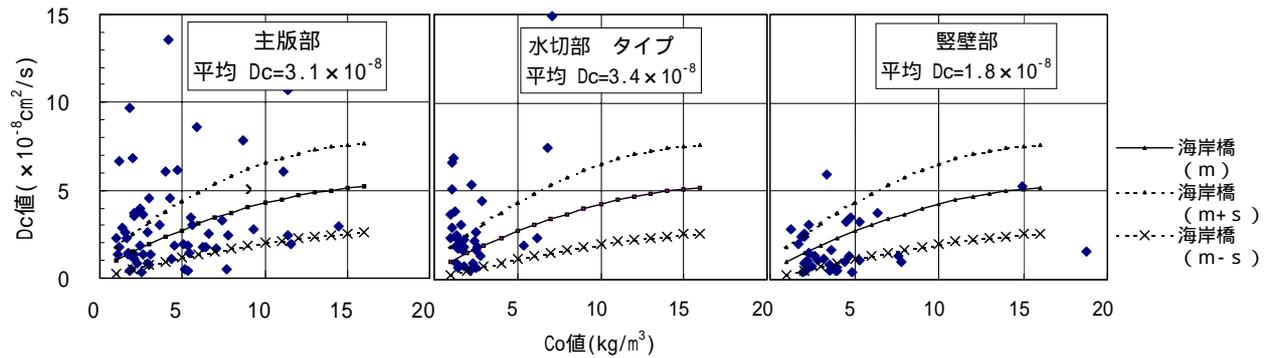


図-12 部位ごとの Co 値と Dc 値の関係 (塩分浸透タイプ)

$1.8 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}$ である。主版部や水切部の Dc 値が、海岸橋の分布上限範囲(m+s)を上回る理由は、漏水による塩分浸透の影響時期が供用期間中の前半や中間に生じ、後半に伸縮装置の改良などにより塩分供給がなくなる場合に、塩分濃度差による拡散により塩分濃度分布勾配が緩やかになり、結果として算定される Dc 値が大きくなることによるものと推察される。豎壁部での Dc 値と Co 値の分布が海岸橋の分布とがほぼ合致することは、凍結防止剤による塩分浸透性は海岸部の飛来塩分による浸透特性と基本的に変わらないことを示唆している。また、豎壁部や主版部の Dc 値で、海岸橋の分布下限範囲(m-s)付近に多く分布する理由は、凍結防止剤の塩分浸透の影響を受ける日数が海岸橋に比べて短いことや、影響を受けた時期が供用期間中の後半であったことによるものと推察される。

4. 結論

凍結防止剤によるコンクリート構造物への塩分浸透状況および塩分浸透性状の分析結果をまとめると次のようになる。

1) 凍結防止剤のコンクリート構造物への浸透は、路面水の飛散による付着、路面水の漏水や融雪水の付着による局部的なものであり、海岸部構造物のように構造物全体に影響することはない。また、コンクリート構造物への影響では、伸縮装置周辺の漏水の影響を受ける上部工端部や下部工などの部位、張出下面の水切部周辺およびトンネルの RC 側壁で浸透している。

3) 伸縮装置部の漏水による周辺部位の塩分浸透は、橋台豎壁部で 90 %、主版部で 75 %、水切部で 50%に認められ、RC 中空床版端部の凍結防止剤の影響範囲は桁端部より 1 m までの場合が多い。

4) 凍結防止剤による塩分浸透分布のパターンは 3タイプ有り、表面より塩分が減少するタイプが 74 %、分布形状が表面部より内部の濃度が大きい山形分布となるタイプが 15 %、深部での塩分濃度が表面部と同程度か大きい分布を示すタイプが 11 %である。

5) 凍結防止剤による塩分浸透性は海岸部の飛来塩分による浸透特性と基本的に変わらないと示唆されたが、凍結防止剤の塩分浸透の影響を受けた時期や日数により、Dc 値が変化すると推察される。

参考文献

- 1) 吉江誠吾, 齋藤辰哉, 渡辺享: 凍結防止剤の環境影響最小化に関する研究, 日本道路公団試験研究所報告, Vol/38, pp.70-79, 2001.11
- 2) 土木学会: 2002 年制定 コンクリート標準示方書「施工編」, pp.22-28,80,2002.3
- 3) 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/ -15, pp.1-14,1991.8
- 4) 青山實伸, 鳥居和之, 松田哲夫: 厳しい塩害環境下におけるコンクリート構造物の塩分浸透性に関する実証的研究, 土木学会論文集, No.746/ -61, pp.251-264,2003.11