

論文 凍結防止剤による下部工の塩化物イオンの浸透性に関する考察

渡辺 暁央^{*1}・小保田 剛規^{*2}・河野 成弘^{*3}

要旨：本論文では、冬期に散布される凍結防止剤が橋梁下部構造に流出することによる塩化物イオンのコンクリートへの浸透性を検討した。多数の橋梁についてコンクリート中の塩化物イオン濃度を調査し、損傷および漏水範囲と対応づけて、橋梁下部構造の塩害の特徴を明らかにした。その結果、漏水の境界付近において、局所的に塩化物イオン濃度が高くなっており、鉄筋腐食が発生している可能性が高いことが示された。この現象を明らかにするため、乾湿繰返し試験による塩化物イオンの浸透性の評価および実構造物の詳細調査を実施し、局所的な乾湿繰返しの影響により高濃度の塩化物イオンが浸透することを示した。

キーワード：凍結防止剤, 塩害, 漏水, 塩化物イオン, 乾湿繰返し

1. 序論

近年、冬期に散布される凍結防止剤によるコンクリート構造物の塩害の事例が多く発生している。凍結防止剤による塩害の特徴は、塩化物イオンの供給が冬期に限られること、損傷が路面排水の流れる箇所および飛散箇所付近に限定されること、ならびに、雨水(冬季は塩化物イオンを含む)が無い場合は乾燥するため、乾湿繰返し作用を受けることなどが挙げられる。そのため、定常的に塩化物イオンが供給され、環境条件の変化が少ない海岸部の飛来塩分による塩害と比較して、構造物の劣化予測および補修方法の検討は、非常に難しいものといえる。

塩害により損傷した構造物の補修対策等を検討するには、コンクリート中の塩化物イオンの浸透性を考慮することが要求される。この場合、補修対象範囲を代表する位置において、塩化物イオン濃度分布を調査することになり、安全側を考慮して最も塩化物イオンが浸透していると推定される箇所を実施する必要があると考えられる。適切な位置でこの調査を実施するためには、構造物における塩化物イオンの浸透性を理解することが重要である。しかし、凍結防止剤による塩害に関する研究報告は少なく、実態が十分に把握されていない。

本研究では、北陸自動車道における橋梁下部構造(以下、下部工)について、凍結防止剤による塩害の実態調査を実施した。この結果に基づいて、塩化物イオン浸透量と構造物の損傷との対応を検討し、凍結防止剤による塩化物イオンの浸透特性を明らかにすることを目的としている。

2. 凍結防止剤による下部工の塩害の特徴

2.1 調査概要

(1) 調査目的

本章は、北陸自動車道の木之本インターチェンジ(以下

IC と表記)(滋賀県)から朝日 IC(富山県)の橋梁において、各 IC 間で代表的な 2 橋を選択し、計 39 橋の下部工について塩化物イオン濃度分布調査および鉄筋の健全度調査を実施し、凍結防止剤の影響によるコンクリートの塩害の状況を把握することを目的としている。この区間(約 260km)では、年間約 8,000 トンの凍結防止剤が散布され、下部工については伸縮装置からの漏水により塩害が発生している。下部工のコンクリートの水セメント比は約 55%であり、供用年数は 24~34 年である。なお、調査では、飛来塩分による塩害が発生する海岸付近の区間(石川県の片山津 IC から金沢西 IC 間)を対象より除外した。

(2) 調査方法

調査位置は、各橋梁の下部工において、伸縮装置から漏水が発生している橋台あるいは掛違い部の橋脚を選定した。伸縮装置からの漏水は、橋台あるいは橋脚の天端を通過して、橋台の堅壁前面あるいは橋脚側面(以下、橋台の堅壁前面あるいは橋脚側面を側面と称する)に伝わっていくため、天端と側面の 2 箇所において調査を行い、部位の相違による塩化物イオンの浸透状況の相違について検討する。調査は、選定した下部工の側面について、漏水の著しい箇所にて行うことを原則とし、付近に損傷(浮き)が存在する場合は、その位置において調査を行った。次に、天端の調査位置は、側面の調査箇所の直上で実施することを基本とするが、調査空間が確保できない場合は、可能な限り近くの調査可能箇所に変更した。

塩化物イオン濃度調査では、JSCE-G 573-2003 に従い $\phi 20\text{mm}$ のドリルを使用して試料採取を実施した。試料採取は、コンクリート表面からの深さ 0-20mm, 20-40mm, 40-60mm および 60-80mm にて試料を採取した。採取した試料は、JIS A1154 の電位差滴定法による全塩化物イオン濃度を測定した。

*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 土木部 博士(工学) (正会員)

*2 中日本高速道路(株) 金沢支社 保全・サービス事業部 改良チーム

*3 中日本高速道路(株) 名古屋支社 彦根保全・サービスセンター 改良担当課長

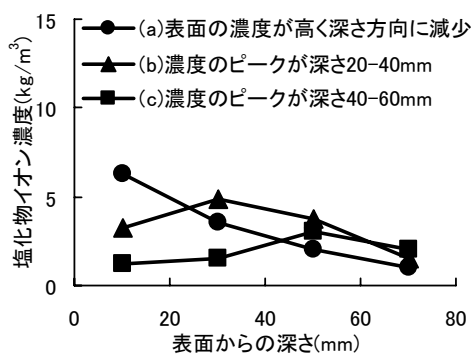


図-1 塩化物イオン濃度分布の形状

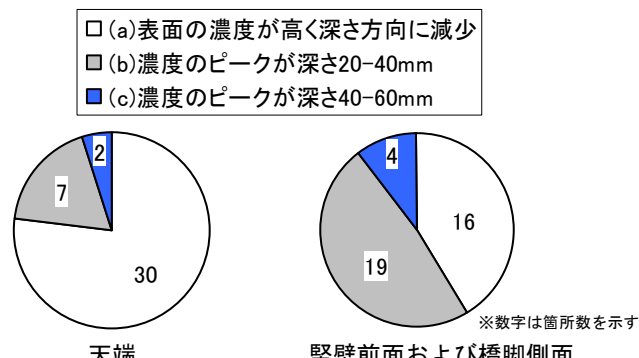


図-2 部位ごとの塩化物イオン分布パターンを集計

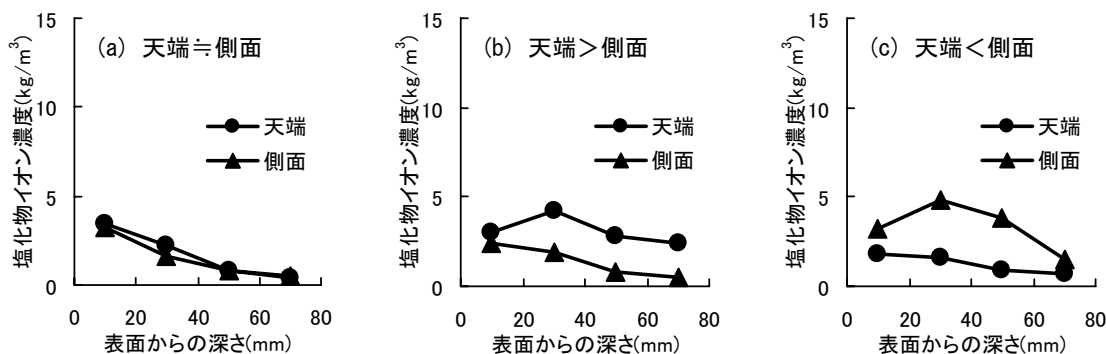


図-3 天端と側面において塩化物イオン濃度を比較した例

鉄筋健全度調査では、塩化物イオン濃度調査位置において 100mm×100mm 程度の範囲をはつり取り、鉄筋を目視にて観察し、鉄筋の腐食状況を判定した。判定は、土木学会の「鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向」¹⁾ に示される 5 段階の評価をした。また、配力筋近傍のコンクリートを採取して、塩化物イオン濃度を測定した。なお、調査時に打音点検を実施してコンクリートの浮き・はく離の範囲を特定している。調査は 11 月(凍結防止剤散布期間の直前)に実施した。

2.2 調査結果

(1) 塩化物イオン濃度分布の形状

図-1 は、代表的な塩化物イオン濃度分布の形状を示したものである。塩化物イオンは、コンクリート表面から浸透するため一般的には図-1 の(a)に示すように、表面付近が最も高濃度であり、深さ方向に減少する傾向を示す。一方、図-1 の(b)および(c)に示すように表面付近の塩化物イオン濃度が低下する場合も認められる。塩化物イオン濃度分布のピークが表面から深い方向にシフトすることについては、一般に中性化の影響を受けることによる塩化物イオンの濃縮現象が知られている²⁾。一方、凍結防止剤による塩害の場合では、塩分供給期間が冬期に限定されることによる塩害環境の季節変動により、ピークがシフトすることが指摘されている³⁾。また、夏期の塩化物を含まない漏水により表層部の塩化物イオンが洗い流されることも考えられ、ピーク位置の変動はそれらの複合的要因によるものと推察される。

図-2 は、調査橋梁 39 箇所における塩化物イオン濃度分布の形状パターンを集計したものである。天端は、表面付近の塩化物イオン濃度が高くなる図-1 の(a)のタイプが多く、既往の報告⁴⁾とほぼ一致する。しかし、側面は表面付近の塩化物イオン濃度が低下する図-1 の(b)のタイプが多いことが確認され、側面における塩化物イオンの浸透性が他の部位と異なることが考えられる。

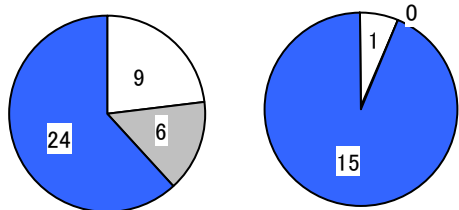
(2) 天端と側面の塩化物イオンの浸透の相違

図-3 は、天端と側面において塩化物イオン濃度を比較した例である。天端と側面の塩化物イオンの浸透状況を比較すると、塩化物イオンの浸透量は天端と側面がほぼ一致するもの、天端の方が多いもの、および側面が多いものの 3 パターンに分類される。図-4 は、図-3 で示した分類に基づき、天端と側面の塩化物イオン浸透量を比較したものである。漏水が天端を通過して側面に至るため、塩化物イオンは天端の方が多く浸透していることが予想されたが、実際には、側面の方が多く浸透している場合が半数以上を占めている。また、側面において損傷(浮き・はく離)が確認され、その位置で調査を実施した場合は、ほとんどの橋梁において天端より側面の方が塩化物イオンの浸透が多いことが示された。

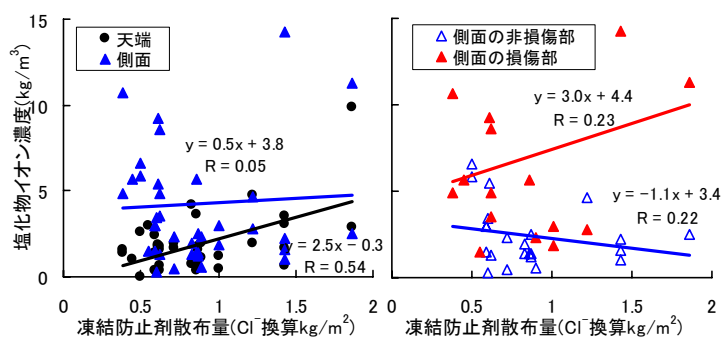
(3) 凍結防止剤の散布量による塩化物イオンの浸透量

塩化物イオン濃度の分布は、(1)で示すように、表面付近において低下する場合がある。そのため、塩化物イオンの浸透量を比較するパラメータとして、深さ 20-40mm の塩化物イオン濃度を使用する。図-5 は、下部工におけ

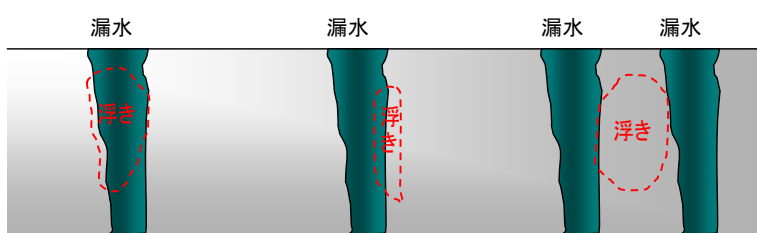
□ 天端≒側面 □ 天端>側面 ■ 天端<側面



(a) 全橋梁 (b) 側面が損傷部の橋梁
図-4 天端と側面の塩化物イオン浸透量の比較



(a) 天端および側面 (b) 側面における漏水部と損傷部
図-5 20-40mmの塩化物イオン濃度と凍結防止剤散布量の関係



(a) 漏水と損傷が一致 (b) 漏水境界に損傷 (c) 漏水の間に損傷
図-6 側面における損傷(浮き・はく離)の典型的なパターン

□ 漏水と一致 □ 漏水の境界 ■ 漏水と漏水の間

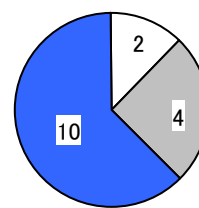


図-7 側面の損傷パターンの集計

る深さ 20-40mm の塩化物イオン濃度と凍結防止剤散布量の関係を示したものである。凍結防止剤散布量は、各 IC 間で散布される凍結防止剤量の統計データをから 1 シーズンあたりの散布量を算出し、IC 間の道路面積で除したものである。側面と天端との結果について、それぞれ相関関係を検討したが、天端では相関係数が $R=0.54$ であり比較的高いものの、側面では相関係数が $R=0.05$ であり、ほとんど相関性が認められない(図-5(a))。すなわち、天端に浸透する塩化物イオン量は、凍結防止剤の散布量に影響を受けるようであるが、側面については全く関係ないことがわかる。その一方で、側面について、調査箇所が損傷部と非損傷部の箇所に分けて検討すると、若干相関係数が高くなる(図-5(b))。また、損傷部では、同じ凍結防止剤散布量であっても、同じ深さにおける塩化物イオン濃度が高いことが明らかである。このことは、側面において、損傷部と非損傷部とでは、塩化物イオン浸透の特徴が異なることを示していると考えられる。

(4) 側面の損傷箇所の検討

調査の結果、側面における漏水範囲の変動は少なく、漏水範囲と損傷(浮き・はく離)の関係は、概ね図-6 に示すパターンに分類される。すなわち、漏水部全体で損傷が発生しているもの、漏水部と非漏水部の境界付近において損傷が発生しているもの、および漏水部と漏水部との間の比較的乾燥している範囲で損傷が発生しているものの 3 種類のパターンが認められる。図-7 は、側面の調査における損傷箇所の損傷パターンを分類したものである。その結果、多くの損傷が、漏水の境界付近および漏水部と漏水部の間の比較的乾燥した範囲で発生してい

る。これは、コンクリート中の塩化物イオン濃度に大きな相違が生じる場合、マクロセル腐食が生じるためであると推定される。この考え方は漏水部で塩化物イオン濃度が高く、非漏水部の塩化物イオン濃度が低い場合、電位差が生じてマクロセル腐食が生じると考えるのが一般的である。しかし、漏水範囲から若干外れている損傷部において調査を実施した場合、(2)および(3)に示すように塩化物イオン濃度が高くなる傾向が示され、一般的なマクロセルの解釈と異なる可能性が示唆される。

(5) かぶりに関する検討

図-8 は、鉄筋健全度調査にて明らかにした配力筋のかぶりを集計したものである。天端および側面について、それぞれ損傷箇所と非損傷箇所の調査結果を個別に示すと、かぶりが小さい箇所が損傷していることがわかる。特に側面では、かぶりが 60mm 未満の箇所は、ほとんどの箇所で鉄筋が腐食しており、かぶりの不足が鉄筋の腐食に対して大きな影響を及ぼすことが明らかである。

図-9 は、鉄筋の腐食に及ぼす塩化物イオン濃度とかぶりの関係を示したものである。側面では、かぶりが 60mm 未満の範囲は全て鉄筋の腐食が確認され、塩化物イオン濃度も全て鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度の 1.2kg/m^3 を超えている。また、塩化物イオン濃度が 1.2kg/m^3 以下でも鉄筋が腐食している箇所も認められるが、これは例外であり、ほぼ 1.2kg/m^3 以下の場合には鉄筋の腐食が発生していない。一方、天端は、 1.2kg/m^3 を超えていても、かぶりが極端に小さい箇所を除いて、鉄筋の腐食が発生しておらず、側面の傾向とは異なっている。すなわち、伸縮装置からの漏水による塩害では、鉄筋腐

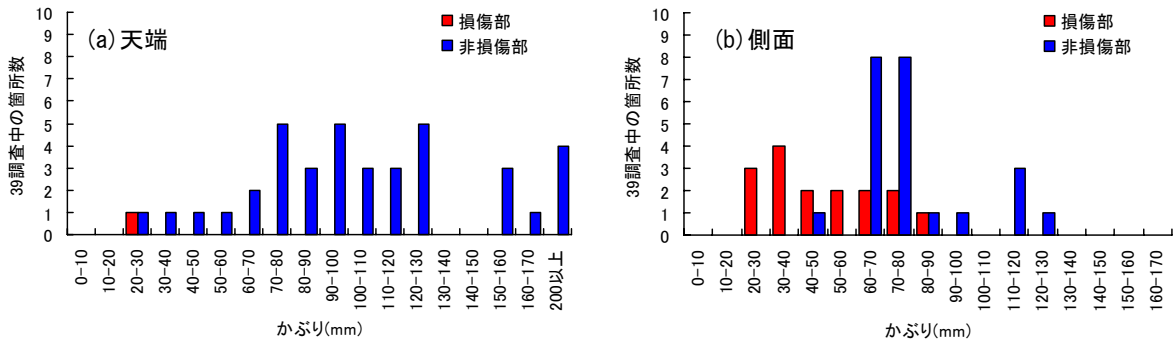


図-8 配筋筋のかぶり(はつり調査による実測値)

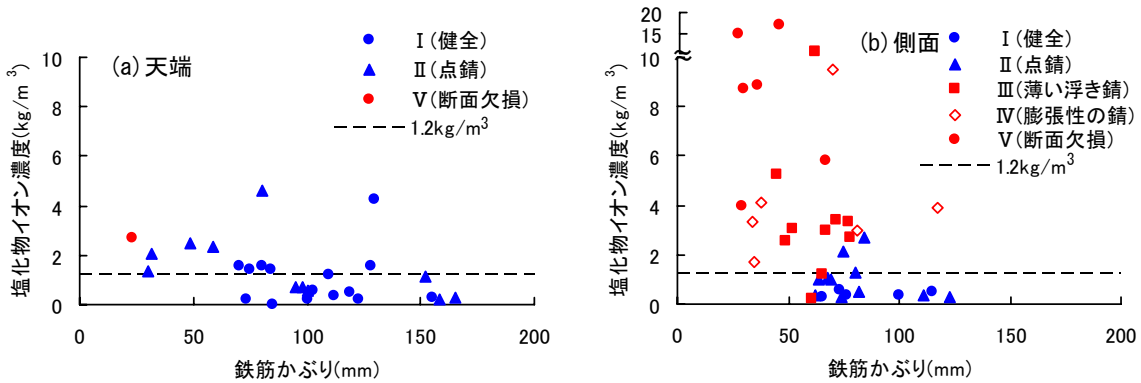


図-9 配筋筋位置における塩化物イオン濃度とかぶりと鉄筋腐食度の関係

食の発生は漏水を受ける部位の環境に大きく影響を受けるものと推察される。

3. 乾湿繰返し試験による塩化物イオンの浸透特性評価

3.1 実験概要

(1) 供試体の作製および養生方法

普通ポルトランドセメントを使用して、水セメント比 0.5 および 0.7 のモルタル(細骨材:セメント=2:1)を作製した。供試体寸法は 40×40×40mm の立方体であり、打設後、材齢 28 日まで密封養生を実施した。その後、曝露面以外の 5 面をエポキシ樹脂にて表面塗装を実施して、塩化物イオン浸透試験用供試体とした。この供試体を塩水噴霧(塩化ナトリウム濃度 3.5%)と乾燥(相対湿度 60%)の乾湿試験装置(温度 40℃)に投入して、促進試験を実施した。塩水噴霧と乾燥の期間は、塩水噴霧 1 日と乾燥 3 日を 1 サイクルとするものと、塩水噴霧 1 日と乾燥 6 日のものの 2 条件にて行った。また、比較のため濃度 3.5% の塩水溶液への浸漬実験も行った。なお、試験期間は、1 および 2 ヶ月間である。

(2) 塩化物イオン浸透性の評価

塩化物イオンの浸透性の評価には、JIS A1154 の電位差滴定法による全塩化物イオン濃度の測定を適用した。全塩化物イオン濃度の測定は、供試体を暴露面から深さ方向に 13mm ごとに 3 等分に切断して実施し、塩化物イオン濃度分布を評価した。

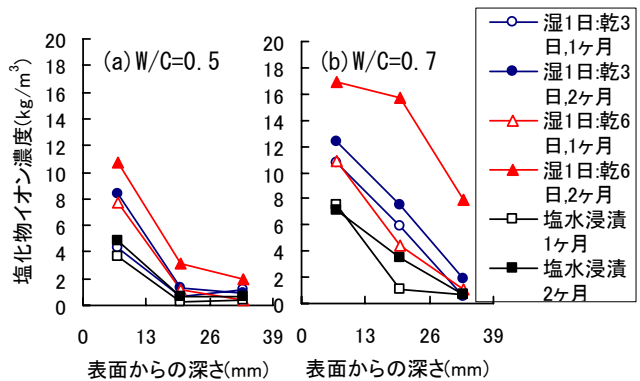


図-10 乾湿繰返し試験による塩化物イオンの浸透

3.2 結果および考察

図-10 は、塩化物イオンの濃度分布を示したものである。水セメント比が 0.5 のモルタルでは、乾湿繰返しを行うことにより、塩水浸漬を実施したものより多くの塩化物イオンが浸透しており、特に乾燥日数を 6 日にして試験を実施した場合は、表面付近の塩化物イオン濃度が塩水浸漬の場合より 2 倍程度多く浸透している。また、乾燥日数が 3 日のサイクルの場合は、深さ 13mm より深い範囲において、それほど多くの塩化物イオンの浸透が認められないのに対して、乾燥日数が 6 日のサイクルで 2 ヶ月間試験を行ったものは、表面から 13mm より深い範囲でも塩化物イオンの浸透が大きくなる。これは、乾燥日数が長くなることにより、供試体の内部まで相対湿度の低下が生じていることを示していると考えられ、塩水噴霧が実施されるときに毛管現象により供試体内部ま



写真-1 T橋の掛違い部橋脚の漏水状況

で短時間に塩化物イオンが供給されたものと推察される。一方、水セメント比が0.7の場合は、試験期間1ヶ月では乾燥日数の相違による塩化物イオン浸透性の変化が現れていないが、試験期間2ヶ月では、乾燥日数の長い方が明らかに塩化物イオンの濃度が高くなっている。

4. 橋脚における塩化物イオン浸透状況詳細調査

4.1 調査概要

(1) 調査目的

北陸自動車道のT橋(供用27年)の掛違い部の橋脚は、写真-1に示すように、掛違い部からの漏水が張出部を伝わって柱部の路肩側曲面に流下している。この柱部の漏水範囲において、局所的に鉄筋かぶり不足しており、損傷(浮き・はく離)が発生している。かぶりの不足は、施工時に鉄筋が路肩側に寄っていたために生じたものと考えられ、橋脚の曲面部の中心付近で最もかぶりが小さく、曲面の開始・終了付近では十分にかぶり確保されている(図-11)。漏水は、かぶりが最も小さい曲面の中心付近で多くなっており、最も損傷が深刻であることが予測された。しかし、実際の損傷は、比較的にかぶり確保されている漏水境界付近で顕著であり、部分的にははく離が発生している。

本章では、この原因を明らかにするために、橋脚の曲面の漏水部について、横断方向に数箇所の塩化物イオン濃度を測定し、漏水範囲と塩化物イオン浸透の対応を検討した。

(2) 調査方法

調査では、打音点検によりコンクリートの浮き・はく離の範囲を特定した後、図-11に示す位置において2.1(2)と同様に塩化物イオン濃度調査を実施した。ただし、曲面中心から曲面終了までの範囲は、深さ20-40mmのみ試料を採取して分析した。なお、鉄筋のかぶりはRCレーダーを用いて測定した。

(3) 帯鉄筋かぶり位置の塩化物イオン濃度の推定

得られた塩化物イオン濃度分布を使用して、Fickの拡散方程式を適用して見かけの拡散係数および表面塩化物イオン濃度を算出した⁵⁾。鉄筋かぶり位置の塩化物イオ

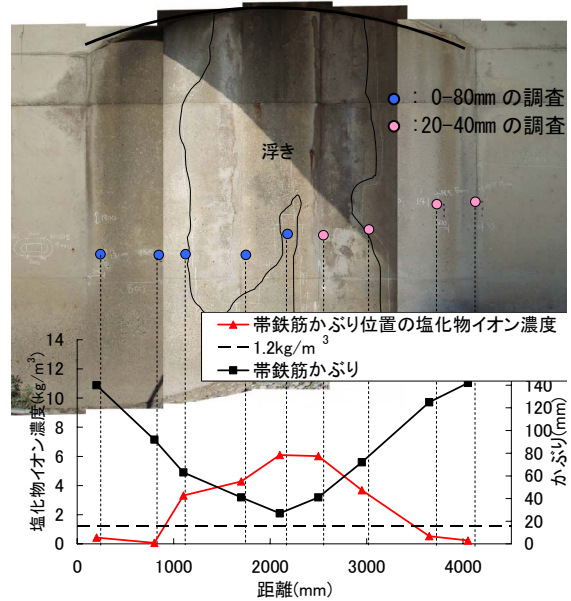
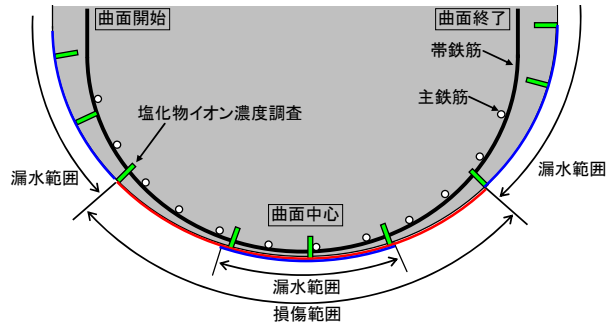


図-12 帯鉄筋位置における塩化物イオン濃度

ン濃度は、算出した見かけの拡散係数および表面塩化物イオン濃度に従う分布になると仮定し、RCレーダーで探査した帯鉄筋かぶり位置における塩化物イオン濃度を推定した。

4.2 調査結果

(1) かぶり不足と損傷の関係

図-12は、推定した帯鉄筋かぶり位置の塩化物イオン濃度とコンクリートの損傷状況の対応を示したものである。損傷範囲では帯鉄筋のかぶりが概ね70mm以下である。かぶりが不足しているため、損傷範囲における鉄筋位置の塩化物イオン濃度が高くなり、帯鉄筋かぶりにおける塩化物イオン濃度は、概ね3kg/m³を超えている。この結果は、2章でも述べたように、塩害環境下にあるコンクリート構造物において、かぶり不足が損傷発生の主たる要因になることを示している。その一方で、橋脚柱部の路肩側曲面の中央部では、鉄筋かぶりが最も小さく、帯鉄筋のかぶりが27mmである。この位置において鉄筋をはつり出して腐食状況を観察すると、帯鉄筋の腐食度はⅡと判定され、損傷が発生していなかった。

(2) 漏水範囲と塩化物イオンの浸透量の対応

図-13は、深さ20-40mmにおける塩化物イオン濃度を

示したものである。損傷部(浮き・はく離)の境界付近の塩化物イオン濃度が非常に高くなっており、損傷境界の局所的範囲にて多量の塩化物イオンが浸透していることが明らかである。この部分は、損傷範囲の境界になっているだけでなく、漏水範囲の境界にもなっている。

5. 考察

以上の調査結果は、凍結防止剤が漏水として流出している場合の塩害では、漏水範囲および損傷(浮き・はく離)の状況により、局所的に塩化物イオンの浸透状況が異なり、漏水の境界付近において塩化物イオンの浸透性が大きくなる事例があることを示している。

この原因の一つは、3章の実験で示したように、乾湿繰返しの影響であると考えられる。乾湿繰返しを受ける場合の塩化物イオンの浸透性については、乾燥から湿潤状態に移行するときに、乾燥部分に塩化物イオンを含む水分で飽水状態となるため、塩化物イオン量は短時間に増大し、乾燥期間が長いほど表層付近の塩化物イオン濃度が高くなることが指摘されている⁶⁾。このことは、海洋構造物において検討が進んでおり、例えば、海水の作用として、絶えず浸漬：乾湿繰返し：毛細管部の塩化物イオンの浸透量は、1:1.8:4.4 という報告⁷⁾もあり、常に海水が供給される環境より乾燥を受ける箇所に定期的に海水が供給される方が塩化物イオンの浸透性が大きい。凍結防止剤による塩害においても、同様の現象が局所的に発生しているものと考えられる。

この考え方に基づくと、2章で示した天端と側面との塩化物イオンの浸透量の相違を合理的に説明することも可能である。すなわち、天端は漏水が滞留しやすく、土砂の堆積も認められることから、側面に比較して比較的湿潤であるため、乾湿を繰返す側面より塩化物イオンの浸透が少なくなったものと考えられる。

その一方で、漏水が著しい箇所では、夏場の凍結防止剤を含まない漏水により、表面部の塩化物イオンが洗い流され、コンクリート内部への塩化物イオンの拡散が少なくなった可能性も考えられる。少なくとも、漏水の境界付近で塩化物イオン濃度が非常に高くなる可能性があり、他の橋梁でも同様の現象が生じているのか検証する必要があるものと考えられる。

6. 結論

凍結防止剤の影響による下部工の塩化物イオンの浸透性について検討した結果は、次のとおりである。

- (1) 橋台の堅壁前面および橋脚側面の塩化物イオン濃度分布は、表面付近の塩化物イオン濃度が低下する場合が多い。
- (2) 橋台の堅壁前面および橋脚側面のかぶりが60-70mm

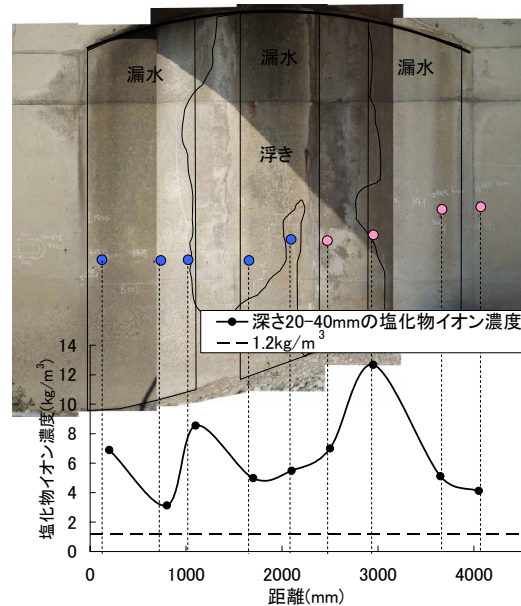


図-13 深さ 20-40mm の塩化物イオン濃度

以下の場合には、凍結防止剤を含む漏水により、鉄筋腐食および損傷(浮き・はく離)が発生する可能性が高い。

- (3) 乾湿繰返し試験において、乾燥期間が長くなると塩化物イオンの浸透量が多くなる。
- (4) 漏水範囲に隣接した部分は、乾湿繰返しにより高濃度の塩化物イオンが浸透している可能性があり、鉄筋腐食が発生しやすいものと推定される。
- (5) 比較的湿潤な天端より、乾燥状態になりやすい側面の方が塩化物イオンの浸透が多いと考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向、コンクリート技術シリーズ No.26, p.126, 1997
- 2) 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
- 3) 三村陽一, 吉武勇, 辻和秀, 浜田純夫：凍結防止剤によるコンクリート版の塩分浸透に関する解析的評価、コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, pp.1231-1236, 2005
- 4) 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
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕
- 6) 丸屋剛, Tangtermsirikul, S., 松岡康訓：コンクリート表層部における塩化物イオンの移動に関するモデル化、土木学会論文集, No.585, V-38, pp.79-95, 1998
- 7) Stark, J. and Wicht, B. (太田利隆ら翻訳): コンクリートの耐久性 第2版, 社団法人セメント協会, 2003