

塩分供給境界における塩分拡散に関する研究

苫小牧工業高等専門学校 正会員 博(工) ○渡辺 暁央
 苫小牧工業高等専門学校 廣川 一巳
 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) 石川 裕一
 中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) 博(工) 青山 實伸

1. はじめに

従来、塩害は海岸付近での飛来塩分によるもの、除塩不足の海砂を使用した内在塩分によるものが主流であったといえる。これらの劣化は構造物全体に発生するため、劣化が進行した場合は大規模な補修や更新が必要となる。そのため、劣化対策の費用は非常に大きいものになり、発注者にとっては予算の確保が問題になるものの、補修を請負う業者にとってはまだ採算に合う工事である可能性がある。一方、高速道路等で冬季に散布される凍結防止剤は、コンクリート構造物に対して局所的な塩害劣化を発生させている。この場合、1つの構造物の劣化箇所が限られており、補修を実施するにも工事規模が非常に小さく、請負業者にとっては全く採算に合わない工事になりやすい。したがって、凍結防止剤の塩害を受ける可能性のある構造物は、予防・保全をしっかりと行ない、劣化が致命的に進行しないように維持管理を行うことが重要であるといえる。そのためには、凍結防止剤による塩害の劣化機構を把握し、維持管理計画に反映させることが必要と考える。

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、劣化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、構造物の劣化予測は非常に難しいものといえる。本研究は、乾湿繰返し作用により塩分供給される局所部位を想定して、実験的検討により劣化の進行過程を明らかにすることを目的としている。

2. 塩分供給境界

本研究では、「塩分供給境界」というものを定義した。これは、文字どおり塩分が供給される範囲の境目のことである。塩分を含むコンクリートと塩分を含まないコンクリートとの境目では、内部の鉄筋においてアノードとカソードが形成され、局部的に腐食電流が流れ、マクロ腐食が発生することが知られている。そのため、塩分供給境界においては、マクロセル腐食が激しいと推定される。実際に、北陸自動車道の橋脚・橋台における実態調査¹⁾では、図-1に示すように、漏水範囲とかぶりコンクリートの浮き・はく離の関係は、漏水部全体で劣化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劣化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劣化が発生しているものの3種類のパターンが認められる。調査した16橋の橋脚・橋台において劣化パターンを分類すると、多くの劣化が漏水の境界付近および漏水部と漏水部との間の比較的乾燥した範囲で発生している。すなわち、塩分供給境界ではマクロセル腐

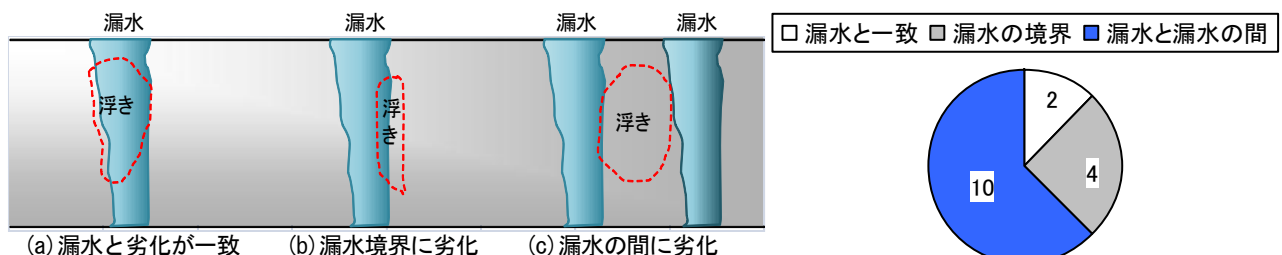


図-1 凍結防止剤の流出による橋脚・橋台の劣化パターンと北陸自動車道における調査集計¹⁾

食が原因と推察される劣化が発生していると考えるのが妥当であろう。

しかし、同じ北陸自動車道のT橋(供用27年)の掛違い部の橋脚において、漏水範囲と塩分浸透量の対応を詳細に調査した結果¹⁾は、塩分供給境界において別の現象も発生している可能性が示唆された。図-2は、T橋における浮き・はく離および漏水の範囲と、横断方向に数カ所の塩化物イオン濃度を測定した結果である。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、劣化範囲の境界において局所的に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、劣化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。この調査結果は、塩分供給境界において局所的に塩分浸透量が大きくなる可能性を示すものであり、単純にマクロセル腐食が発生して劣化が激しいと判断することに疑問を持たせるものである。

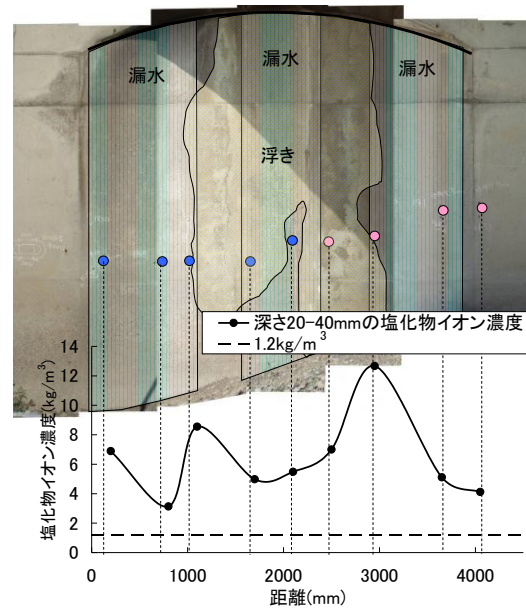


図-2 T橋の掛違い部橋脚の劣化・漏水状況と深さ20-40mmの塩化物イオン濃度¹⁾

3. 塩分供給境界の模擬実験²⁾

3.1 実験概要

実構造物の調査では、塩分供給境界において塩分濃度が高くなる可能性が示されたが、その理由については特定できていない。そのため、壁面を模擬したコンクリート供試体を作製して、供試体の半分に定期的に塩水を流下させる実験を行い、塩分供給境界において浸透する塩分量を把握し、実構造物と同様に塩分濃度が高くなるかを確認することを目的とした模擬実験を行った。

寸法は高さ600mm×幅400mm×厚さ100mmで、W/C=55%のコンクリート供試体を打設した。配合を表-1に示す。打設後1週間の湿潤養生を行った後、3ヶ月間、屋外にシートを覆って放置した。図-3に示すように、供試体の型枠脱型面(600×400mmの面)の半分に濃度3.5%の塩水を流下させる装置を作製した。塩水の流下頻度は、1日の塩水流下と6日間の放置(室内での自然乾燥)を繰り返すものとした。

塩水流下実験開始後は、塩水流下停止後に外観観察を実施するとともに、塩水供給境界付近の数カ所において、JSCE-G 573-2003に準じてφ20mmのドリルを使用して、深さ0-20mm、20-40mm、40-60mm、60-80mmで粉末試料を採取し、蛍光X線法³⁾による塩分濃度試験を実施した。なお、塩分浸透の経時変化を比較するために、1週目から4週目までの4回の試料採取を行った。採取位置は垂直方向の位置を変化させず、水平方向の位置を供試体の下部の方から順に変化させて削孔した。また、削孔後は補修を行い、削孔を通じて塩分が浸透しないようにした。

表-1 配合

W/C (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)				
				セメント	水	細骨材	粗骨材	AE減水剤
55	41	8	5	250	138	817	1189	2.5

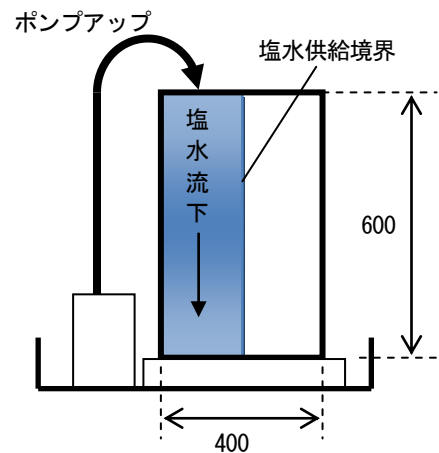


図-3 実験装置概要

3.2 結果および考察

(1) 外観の状況

写真-1は、塩水流下実験開始後の1週目および4週目の塩水流下停止後の塩水供給境界付近の外観を示したものである。1日間の塩水流下後には、供給境界線(点線)より乾燥側に塩水が浸透して濡れている状態となっており、その濡れている範囲と乾燥部の境界線上に白華現象が確認された。塩水供給境界の外側の濡

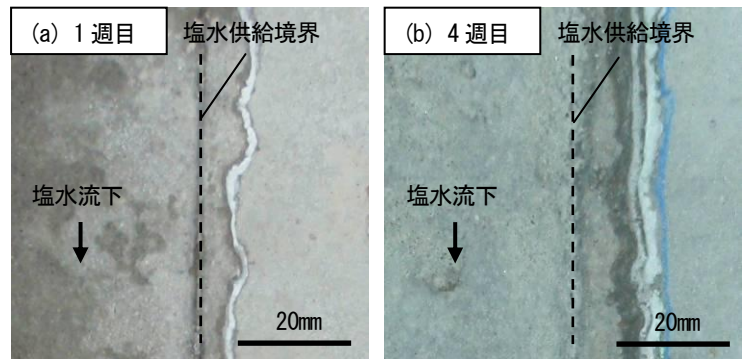


写真-1 塩水供給境界付近の外観

れの範囲は、1週目の流下実験後に5~10mm程度であったが、2週目以降も徐々に拡大し、4週目では約20mmの幅になっていた。また、白華現象もこの濡れの範囲の拡大にもとない外側に移動した。図-4は、この白華現象による析出物を採取してX線回折を実施したものである。その結果、塩水作製に使用した食塩(NaCl)よりピークの大きさが小さいものの、NaClを主成分とする結晶であると判断される。

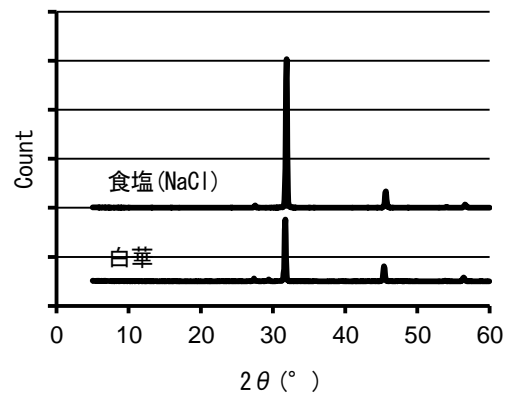


図-4 白華のX線回折の結果

(2) 塩分浸透状況

図-5は、塩水供給境界付近における塩分濃度試験の結果を示したものである。塩水流下部および塩水供給境界内側の塩分浸透量は、ほぼ同じ傾向を示しており、塩水流下を繰り返すことにより、表層部の深さ0~20mmにおいて塩分が蓄積されていくことが確認される。しかし、4週までの塩水流下の繰り返しでは、深さ20mmより深いところに塩分の浸透がほとんど認められない。一方、塩水供給境界外側では、表層部の深さ0~20mmにおいて、塩水流下部よりも塩分量が多くなっている。また、2週より1週の塩分量の方が多くなっている。これは、写真-1で示した白華による影響であり、本実験では表面の白華を除去せずに試料採取を行ったため、白華の生成状況により、表層部の塩分量にばらつきが発生したものと考えられる。そのため、表層部の

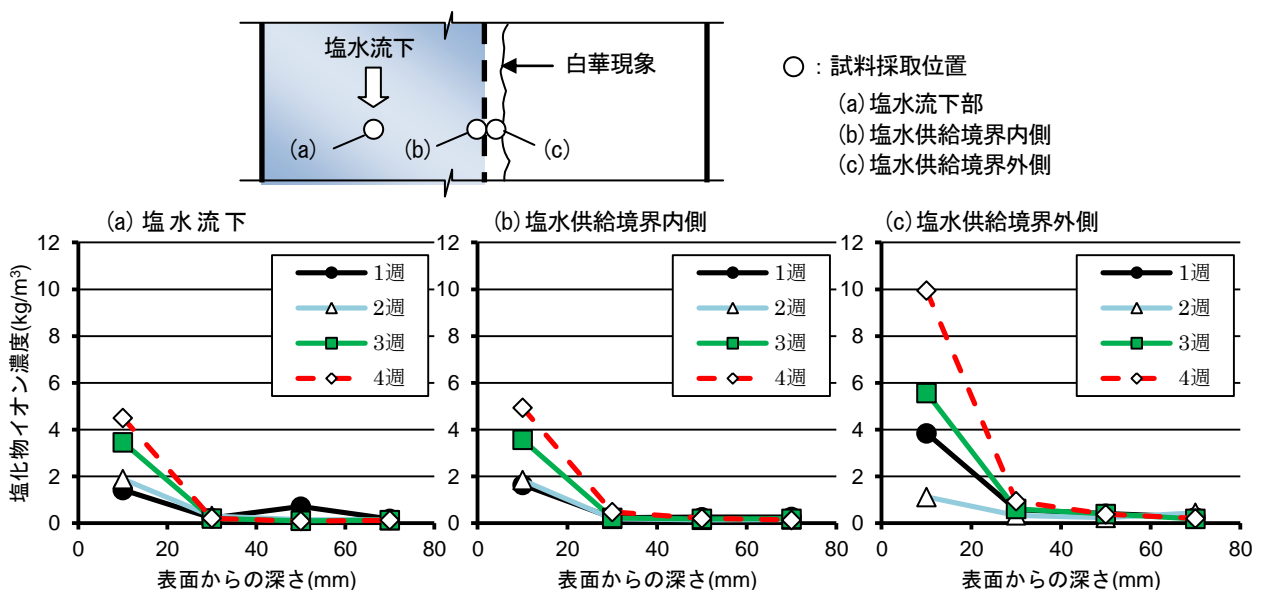


図-5 塩分濃度試験の結果

データだけでは、塩分浸透量が多いのではなく、単に付着塩分が多いと判断することが妥当といえる。しかし、深さ 20~40mm では、塩水流下部と異なり、4 週目では約 1kg/m^3 まで増大しており、明らかに塩分量が多くなっている。このことは、白華による表面の付着塩分量が多くなったことにより、内部への塩分拡散も多くなるためと考えることができる。その一方で、実験期間がわずか1ヶ月であることを考慮すると、表面塩分量の増大だけで説明できる塩分浸透量ではなく、白華発生にも関連する境界部の毛管現象を解明する必要があると考える。

4. 今後の展開

4.1 塩分供給境界における塩分浸透・拡散挙動の把握

一般的に塩害を討論する場合は、塩分浸透が Fick の拡散方程式に従うものとして扱う。この Fick の法則は、塩分浸透を1次元の拡散と扱い、塩分供給面の塩分量が常に一定であるということを前提条件としており、飛来塩分による塩害の場合には非常によく適合する。しかし、限定的な塩分供給を受ける凍結防止剤の塩害では、表面塩化物イオン量をどのように設定するのが課題である。そもそも本研究の調査・実験結果が示すように塩分浸透が毛管現象に大きく影響する可能性が大きく、Fick の法則を適用することが適切かどうか疑問を有する。また、塩分供給の境界付近において2次元の浸透現象が発生しているものと推定される。そのため、供試体レベルでの塩分浸透実験を継続して実施し、表面部分の塩分蓄積状況の把握を行うとともに、塩分供給境界における2次元的な塩分移動を評価する。

4.2 コンクリートの細孔構造の連続性評価と毛管現象の関係説明

凍結防止剤の塩害が毛管現象に大きく依存すると仮定するならば、塩分の浸透はコンクリートの細孔構造の連続性と密接に関連する。局所的な細孔構造の評価は、著者の博士論文⁴⁾で取り上げたコンクリート研磨面の反射電子像による評価が威力を発揮する。図-6は、水セメント比(W/C)の違いによる反射電子像と毛細管空隙に関する2値化像の例を示したものである。W/C=40%の場合は毛細管空隙が細かく分散しているのに対して、W/C=60%の場合は比較的大きな毛細管空隙が点在している様子が分かる。この技術を本研究に導入すれば、塩分供給境界の湿潤側と乾燥側とで細孔構造が変化するかを評価することも可能であるし、細孔の連続性と毛管現象との対応を検討することも可能と考える。最終的には、塩分供給境界における塩分浸透過程をモデル化し、劣化予測システムを構築することを目指すものである。

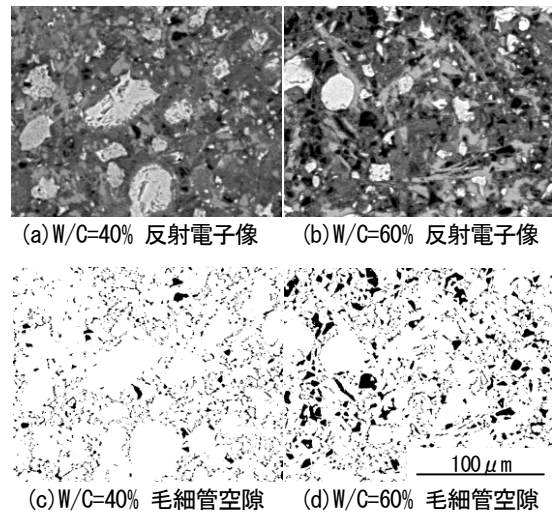


図-6 反射電子像と毛細管空隙の2値化像の例(材齢 28 日)

参考文献

- 1) 渡辺暁央, 小保田剛規, 河野成弘: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.741-746, 2008
- 2) 渡辺暁央他: 塩分供給境界における塩分拡散に関する実験的検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会, V-180, pp.359-360, 2010
- 3) 渡辺暁央, 平野誠志, 青山實伸: 蛍光 X 線法によるドリル採取試料の塩化物イオン濃度測定, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1987-1992, 2009
- 4) 渡辺暁央: 反射電子像の画像解析によるセメント硬化体内部組織の定量評価に関する研究, 金沢大学博士論文, 2005