

論文 劣化環境の違いが断面修復コンクリートにおける水分と塩分の拡散に及ぼす影響に関する実験的研究

金 侖美*1・千歩 修*2・福山 智子*3・長谷川 拓哉*4

要旨：各種要因によって性能が低下した鉄筋コンクリート部材は、補修により性能を回復させることで寿命を延長している。しかし、積雪寒冷地においては補修後に、早期再劣化が発生した事例が多く見られる。本研究では、積雪寒冷地で補修後早期再劣化が発生する原因を明らかにするために、塩水片面吸水試験と塩水片面吸水凍結融解試験を行い、断面修復コンクリート中の水分と塩化物イオンの移動状況を検討した。その結果、塩害と凍害の複合劣化環境において断面修復材の凍害による劣化が大きいほど含水率が大きくなり、塩化物イオンの拡散が著しくなることが分かった。

キーワード：塩害、凍害、複合劣化、再劣化、物質移動、ポリマーセメントモルタル

1. はじめに

日本では高度経済成長期以来、多くの鉄筋コンクリート構造物が建設されてきたが、2016年には建設後50年以上経過した橋梁が全体の20%に達し、2026年には47%の橋梁が高齢化するという報告がある¹⁾。一般に、鉄筋コンクリート部材は様々な劣化要因の影響を受けて劣化するが、耐久性の向上と寿命の延長を目的として補修が行われる。しかしながら、目標とした補修後の耐用年数の前に再度補修を必要とするものがあり、特に積雪寒冷地においては、断面修復工法で補修した鉄筋コンクリートが補修後1,2年の間に再劣化する事例が数多く報告されている²⁾。寒冷地では塩化物系の融雪剤が多く使用されており鉄筋の腐食の原因として懸念されているが、これに加え、コンクリート躯体が塩化物イオンの浸入と同時に凍結融解の繰返しを受けることで、補修部の塩化物イオンの濃縮現象³⁾や、浸透圧増加による凍害劣化の促進、スケーリングの促進が発生する。

北海道は積雪寒冷地であり、塩害と凍害を同時に受ける鉄筋コンクリート部材が多い。現在、補修材料や工法について多くの研究がなされているが^{例えば、4,5,6)}、積雪寒冷環境における補修コンクリートの早期再劣化に関する研究は少ないのが実状である。

本研究では、鉄筋腐食以外の原因でコンクリート構造物に補修後の早期再劣化が生ずる劣化を想定した。凍結融解作用および凍害劣化が塩化物の移動性状に影響を及ぼすと考え、塩害や凍害、これらの複合劣化による断面修復コンクリートの補修前後の水分移動や水分移動による塩化物イオンの拡散性状から、早期再劣化の発生メカニズムの解明に関する検討を行った。

2. 実験概要

2.1 実験計画

表-1に実験計画を示す。本研究では、補修材を適用した補修後のコンクリート試験体を対象に、塩害および塩化物作用と凍結融解による複合劣化を受ける場合の補修前後の含水率と塩化物イオン含有量の変化を測定するものである。

補修材の耐凍害性や緻密性が水分や塩化物イオンの拡散に影響すると考えられ、既往の研究⁷⁾から比較的耐凍害性が低く、塩化物浸透抑制効果が小さいと考えられるセメントモルタルおよび耐凍害性・塩化物浸透抑制効果が高いとされる市販のポリマーセメントモルタルを補修材として選定した。

2.2 実験方法

表-2に実験に用いたコンクリートの調合および各種性状を示す。試験体の作製は、まずコンクリートを $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱の型枠に打設し、脱型後2週間水中養生・2週間気中養生を行った。養生完了後、コンクリートカッターを用いて $\phi 100 \times 40 \text{mm}$ の試験体を切り出し、各劣化環境及び補修材の種類ごとに13体作製した。ここでは、塩化物イオン含有量測定用に12体(2体 \times 6回測定)、質量含水率測定用に電極を埋設した1体としている。切断後、試験体の片面を吸水面とし、吸水面以外からの水分の移動を防ぐために吸水面以外の面にエポキシ樹脂を塗布した。これらの試験体を、塩害環境および複合劣化環境を想定した試験に供した。また、表-3および表-4に補修材の調合と基礎性状を示す。

本実験における劣化環境は、図-1に示すように補修前の試験体を20°C, 60% RHの環境下で3.5wt%の塩水に

*1 北海道大学 大学院工学院空間性能システム専攻 博士課程 (学生会員)

*2 北海道大学 大学院工学研究院空間性能システム部門 教授 工学博士 (正会員)

*3 北海道大学 大学院工学研究院空間性能システム部門 助教 博士 (工学) (正会員)

*4 北海道大学 大学院工学研究院空間性能システム部門 准教授 博士 (工学)

片面吸水させた後にポリエチレン袋で密封し、凍結防止剤等による塩化物イオンの浸透を想定した。また複合劣化環境については、塩水に浸けた状態で凍結融解作用を与え、塩化物の作用と凍結融解作用を複合的に受ける環境を想定した。凍結融解は-20°C (2.5h) ~ +20°C (1.5h) で1サイクルとなる槽内温度条件とした。これらの条件は、道路橋のコンクリート部材等が融雪材の使用により劣化し、補修の前処理(脱塩)の不足のまま断面修復し、補修後の凍結融解作用により部材内部で塩化物の移動や拡散があることを想定したものである。

コンクリート試験体を各劣化環境に1週間静置した後、塩水吸水面を打継ぎ面としてセメントモルタルおよびポリマーセメントモルタルを補修部の厚さが30mmとなるように施工した。セメントモルタルで補修する際はドライアウト防止のため打継ぎ面を湿潤状態にして施工し、ポリマーセメントモルタルは乾燥させてプライマーを塗布した後に施工した。施工後、補修部底面を吸水面とし、吸水面以外の面に再度エポキシ樹脂を塗布した。その後、補修した各試験体を再び補修前と同じ劣化環境に4週間静置した。これにより、塩化物イオンが残存した状態で

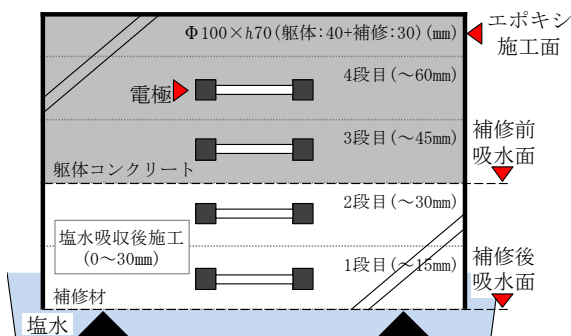


図-1 試験体及び片面吸水の概念図

断面修復により補修したコンクリート部材が再劣化を受ける状態を想定した。

表-1 実験計画

実験要因	実験水準
劣化環境	- 塩害: 塩水片面吸水 (NaCl 3.5wt% 溶液), 20°C, 60% RH - 複合劣化 (塩害と凍害): 塩水片面吸水 (NaCl 3.5wt%溶液) 凍結融解 (-20°C (2.5h) ~ +20°C (1.5h))
補修材料	- セメントモルタル - ポリマーセメントモルタル
測定項目	- 質量含水率 (電極法による比抵抗測定 ⁹⁾) - 塩化物イオン含有率 (JIS A 1154, 電位差滴定法)
測定部位	- 1 段目 (0~15mm) - 2 段目 (15~30mm) - 3 段目 (30~45mm) - 4 段目 (45~60mm)

*劣化開始前 (O) や補修前 (1stD) の測定はコンクリートのみであり、吸水面は補修材の施工により3段目になる。

表-2 コンクリートの調合及び各種性状

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				空気量 (%)	圧縮強度 ₂₈ (MPa)	全塩化物イオン含有量 (kg/m ³)
		W	C	S	G			
50	44	185	370	816	1,025	0.9	40	0.15

*C: セメント (普通ポルトランドセメント, 密度: 3.16g/cm³), S: 陸砂 (表乾密度: 2.67g/cm³), G: 砕石 (表乾密度: 2.68g/cm³)

表-3 セメントモルタルの調合及び各種性状

W/C (%)	c/s (%)	単位量 (kg/m ³)			圧縮強度 ₂₈ (MPa)	密度 (kg/m ³)	全塩化物イオン含有量 (kg/m ³)
		W	C	S			
50	45	305	610	1,345	19	2,174	0.3

表-4 ポリマーセメントモルタルの調合及び各種性状

区分	主成分	混合比 (質量比)	圧縮強度* (MPa)	密度 (kg/m ³)	全塩化物イオン含有量 (kg/m ³)	透水量* (ml/h)	吸水量* (g)
主材	ビニロン繊維, 軽量骨材配合プレミックスセメント	20	37.2	1,315	3	0.1	17.8
硬化剤	カチオン性 SBR 系樹脂	5					

*製品の技術データから参照した。

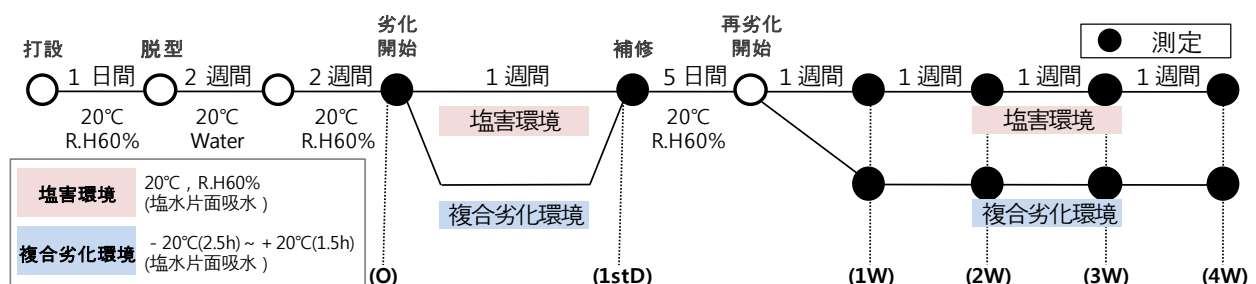


図-2 実験のフロー

実験フローを図-2 に示す。測定項目は、質量含水率と塩化物イオン含有量であり、図中に●印で示されている時点、すなわち、コンクリート試験体の劣化開始前(O)および劣化後の補修前(1stD)と、補修後の試験体の再劣化開始から1週ごとに4週目まで測定した(1w, 2w, 3w, 4w)。測定部位は、吸水面からの水分および塩化物イオンの移動を検討するために、図-1 のように補修部分は吸水面から15mmまでを1段目、15mmから30mmまで2段目とし、コンクリート部分は30mmから45mmまでを3段目、45mmから60mmまでを4段目として試験体を計4部位に分割した。分割する間隔は、本実験で使用した含水率センサーの電極を埋め込める厚さの限界値として15mmとした。試験体の質量含水率は、電極間の比抵抗を測定し式(1)の質量含水率と温度の関係式⁸⁾から算出した。

$$M = \frac{\frac{3892}{273+t} - \ln(\rho) + 1.576}{1.085} \quad (1)$$

ここに、 M ：質量含水率 (%)

t ：測定温度 (°C)

ρ ：比抵抗 ($\Omega \cdot \text{mm}$)

また塩化物イオン含有量は、図-1 における試験体を各段に切断後、段ごとに粉碎した試料を対象に、JIS A 1154 の電位差滴定法に準じて測定を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 質量含水率

劣化開始前、補修前および補修後1週から4週までの試験体の深さごとの質量含水率の累積値(1段目から4段目までの質量含水率の合計)を図-4 に示す。図より、塩害環境と複合劣化環境と比較すると、複合劣化環境を受けた試験体の質量含水率の累積値が塩害環境より高い結果となった。これは、凍結融解作用は含水率を上昇させる効果があることや、断面欠損(図-3 (a))や補修材吸水面のスケーリング(図-3 (b))によって組織の緩みが生じたことが原因と考えられる。なお、コンクリートと補修部界面の剥離やコンクリート部の凍害劣化は認められなかった。

(1) コンクリート部分(3, 4段目)の質量含水率

補修前の質量含水率は、塩害環境の1stDの質量含水率の累積値が約9.1%でOより約0.5%増え、複合劣化環境の1stDは10.0%となりOより約1.2%増加した。これは、複合劣化環境では凍結融解作用によって含水率の上昇が大きくなったためと思われる。また、全ての試験環境において、3段目、4段目いずれも1stDから1wの間で含水率が若干減少する傾向がある。これは、補修材料を施

工する前(図-2の(1stD))まで試験体は気中で乾燥したためであるが、吸水面以外のエポキシ樹脂により乾燥による水分の移動が抑制されその変化が少なかったと考えられる¹⁰⁾。

補修を行った後の質量含水率は、塩害環境を受けた試験体は補修材の種類に関わらず質量含水率の累積値が1stDから4wまでに約0.3%減少した。これは、コンクリートの表面がエポキシ樹脂および補修材で覆われているので表面から水分が逸散できないことから、コンクリートから補修材に水分が移動していることが考えられる。一方、複合劣化環境に暴露した試験体は、塩害環境と同様の傾向が見られず質量含水率の累積値が増加する傾向が見られた。これは、凍結融解作用により補修材からコンクリートまで水が吸水されているものと考えられる。

(2) 補修部分(1, 2段目)の質量含水率

塩害環境に暴露した試験体の補修部は、2wの質量含水率の累積値が1wの値より低下したが、時間の経過により徐々に増加する傾向を示した。なお、セメントモルタルで補修した試験体の場合、2段目の質量含水率の変化が小さく、主に1段目の質量含水率の変化によって質量含水率の累積値が変化の様子が見られた。

複合劣化環境を受けた試験体は、1wから3wまで質量含水率の累積値が増加し、塩害環境と同様に1段目の質量含水率の変化によって質量含水率の累積値が変化した。さらに、ポリマーセメントモルタルの場合、1段目の質量含水率が1wの1.3%から2wの4.0%に約3倍増加した。これは、目視で確認できない凍害による組織の緩みやマイクロアイスレンズ(Micro-Ice-Lens)の形成によるポンプ作用^{11,12)}等によって質量含水率が増加したと思われる。2段目においては影響が少ないものと考えられる。一方、ポリマーセメントモルタルとセメントモルタルの両方とも各段の含水率が3wから4wまでに減少しているが、セメントモルタルの場合、凍結融解作用によって1段目の電極の一部が露出(図-3の(a))したため、信頼できない値と思われる。



(a) セメントモルタルの断面欠損

(b) ポリマーセメントモルタルのスケーリング

図-3 4週間複合劣化を受けた試験体の外観

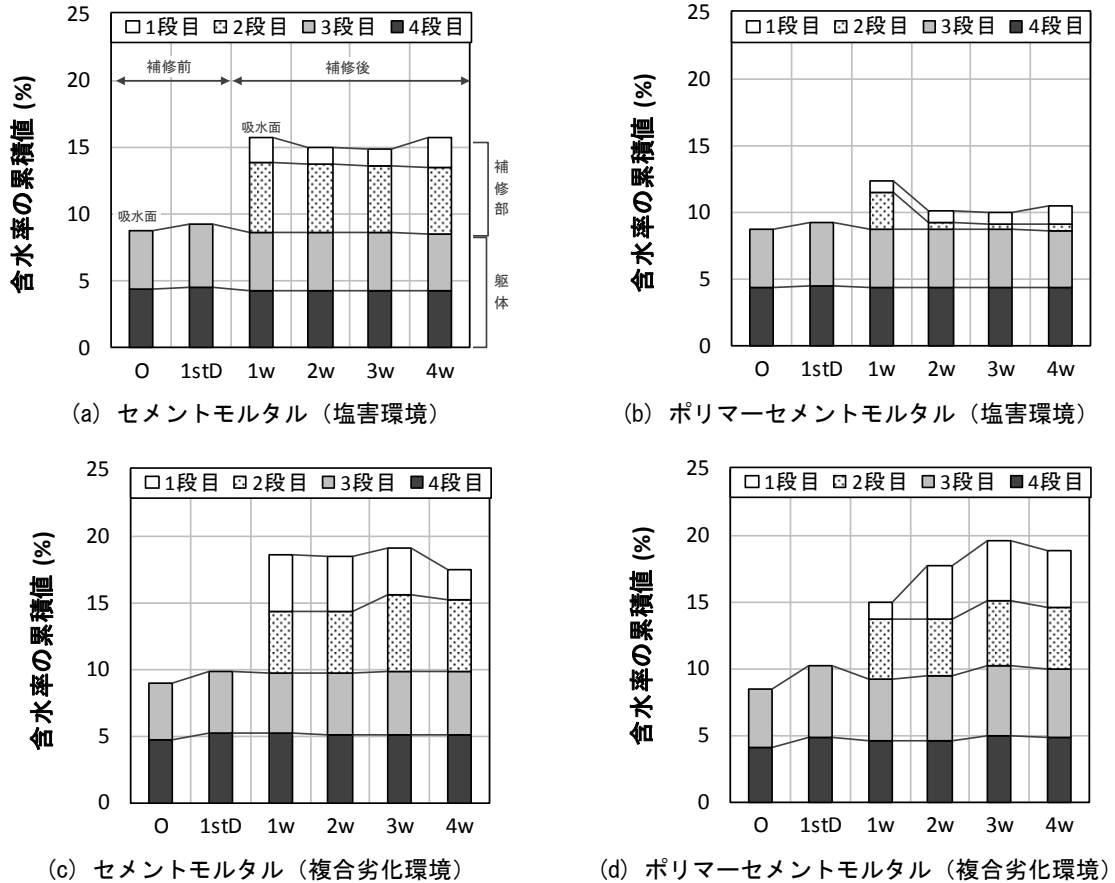


図-4 質量含水率の変化

3.2 塩化物イオン含有量

塩化物イオン含有量は、劣化させる前（図-1の(O)）の含有量を0とした。ここでは、各材料の全塩化物イオンの量（表-2～表-4）を差し引き、マイナス値を除外してデータをまとめた。図-5 に補修材料及び劣化環境ごとに、補修前（1stD）と補修後再劣化4週まで、各段の塩化物イオン含有量の累積値の変化を示す。

その結果、補修材料で比較すると、塩害環境と複合劣化環境のいずれもセメントモルタルで補修した試験体よりポリマーセメントモルタルで補修した試験体の方が、塩化物イオンの含有量が少ない結果となった。これは、セメントモルタルに比べてポリマーセメントモルタルの緻密性が高いことが原因と考えられる。

(1) コンクリート部分(3, 4段目)の塩化物イオン含有量

補修前の場合、塩害環境より複合劣化環境を受けた試験体の塩化物イオン含有量が小さくなった。これは、凍結過程では塩水が凍結し、水分移動が行われなため、あるいは塩水の凍結時に未凍結部分の塩分濃度が多くなり、試験体から高濃度塩水への逆方向の水分移動が生じていること等が考えられる。

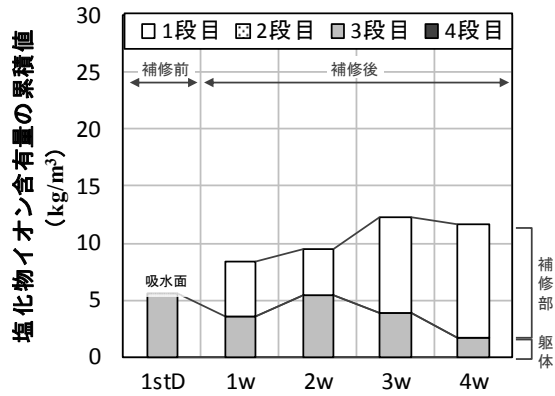
補修後の塩害環境を受けた試験体は、3段目は1wの塩化物イオンの含有量が1stDより低い値を示すが、2wに

は1wより塩化物イオンの含有量が高くなり、以後4wまで次第に減少する傾向が見られた。なお、4段目は1stDから4wまでの含有量が0であったので、4段目までは塩化物が移動していないといえる。これは、補修を行う前に1週間塩水を吸収させた試験体において（図-2の(1stD)）、塩化物イオンが十分に拡散しなかったことや、背面のエポキシ施工により吸水面からの水分の移動が少なく塩化物イオンの拡散が難しかったことが考えられる¹⁰⁾。

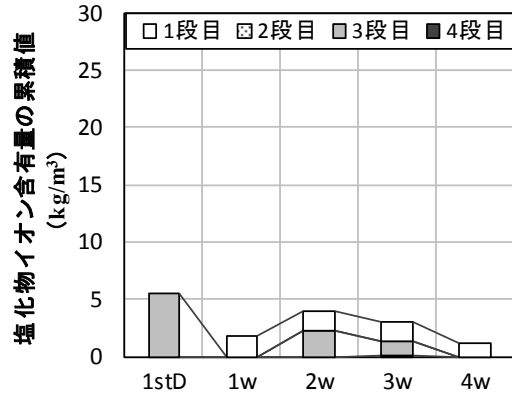
補修後の複合劣化環境の場合、セメントモルタルで補修した試験体の1stDから4wまでは塩化物イオン含有量の累積値が増加する傾向があり、4wの4段目において塩化物イオンの増加が確認された。ポリマーセメントモルタルで補修した試験体の3段目の値は1stDより1wの塩化物イオン含有量が少なくなるが、3wまで塩化物イオン含有量の変化は現れなかった。しかし、4wの3段目は塩化物イオン含有量の増加が確認された。これは、凍結融解作用によって吸水面に劣化（図-3(b)）が生じ、塩化物浸透抑制効果が低下したためと考えられる。

(2) 補修部分(1, 2段目)の塩化物イオン含有量

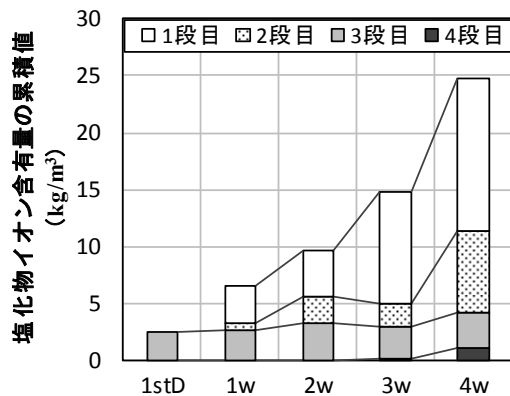
塩害環境における塩化物イオン含有量の変化は、セメントモルタル、ポリマーセメントモルタルのいずれも2



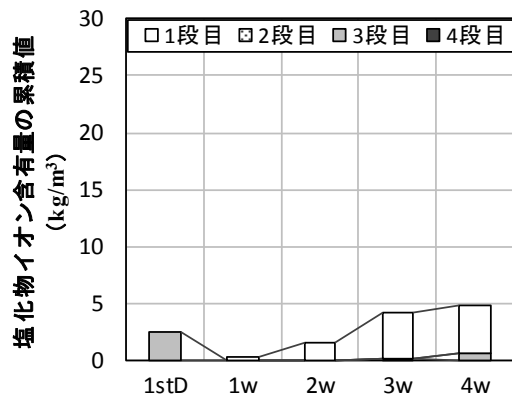
(a) セメントモルタル (塩害環境)



(b) ポリマーセメントモルタル (塩害環境)



(c) セメントモルタル (複合劣化環境)



(d) ポリマーセメントモルタル (複合劣化環境)

図-5 塩化物イオン含有量の変化

段目の塩化物イオン含有量は増加しなかった。なお、セメントモルタルの1段目の塩化物イオン含有量は1wから4wまで増加し、1段目の4wは塩化物イオン含有量が 10.0kg/m^3 まで増え、1段目の1wの約2倍の値となった。一方、ポリマーセメントモルタルの塩化物イオン含有量は1段目の1wが 1.8kg/m^3 であり、時間に伴って徐々に減少し4wで 1.1kg/m^3 となった。ポリマーセメントモルタルの場合は、ある程度の塩化物が浸透するものの、その後の塩化物の浸透が抑制されるものと思われる。

複合劣化環境におけるセメントモルタルの場合、時間とともに各段の含有量が増加し、4wでは目視で凍害劣化(断面欠損)が確認できた。ポリマーセメントモルタルの場合、2段目の含有量は0のまま変化せずに、1段目の塩化物イオン含有量が徐々に増加した。凍結融解作用には塩化物イオン浸透の促進効果があると考えられ、セメントモルタルのように凍害劣化が生じるとさらに含水による塩化物イオン浸透が促進されるものと思われる。なお、図-4では含水率の大きな増加は認められなかったが、これは含水率センサーとモルタルの接触面積が凍害

劣化の発生により変化し含水率を正確に測定できていない可能性も考えられる。

3.3 質量含水率と塩化物イオン含有量の関係

各試験体の各週の質量含水率の累積値を縦軸に、塩化物イオン含有量の累積値を横軸にとったグラフを図-6に示す。この図から、塩害環境下にあるセメントモルタル補修試験体(図-6のAC)は、質量含水率の累積値の変動範囲が15~16%であり、塩化物イオン含有量は $8.5\sim 12\text{kg/m}^3$ の範囲で変化した。ポリマーセメントモルタルで補修した試験体(図-6のAP)はセメントモルタルで補修した試験体より低い値の変動範囲となり、質量含水率の累積値は10~12%、塩化物イオン含有量の累積値は $1\sim 4\text{kg/m}^3$ の範囲となった。これは、試験体の含水率が高く含水率変化の小さい条件における塩化物の浸透は、補修材の緻密さに影響を受けているものと考えられる。

塩害と凍害の複合劣化を受けた試験体の場合は、セメントモルタルで補修を行った試験体(図-6のFC)の質量含水率の累積値が17~19%の範囲で大きな変動は認められないが、塩化物イオン含有量は $6\sim 25\%$ の範囲で大きく変化した。一方、ポリマーセメントモルタルで補修

を行った試験体（図-6のFP）はセメントモルタルで補修した試験体より塩化物イオン含有量の変化範囲が狭いが、含水率の増加傾向が認められ、含水率が大きくなるほど塩化物イオン含有量が大きくなる傾向を示した。これは、凍結融解作用によって含水率が増加し、それに伴って塩化物が移動しているものと考えられる。なお、凍害（組織の緩み）の発生によることも考えられるが、目視では3wまで凍害が確認できなかった。また、複合劣化の4wでは、セメントモルタルでは断面欠損、ポリマーセメントモルタルでは軽微なスケーリングが認められた。両者との3wと4wの塩化物イオンは増大しており、凍害劣化は塩化物の浸透を増大させるといえる。

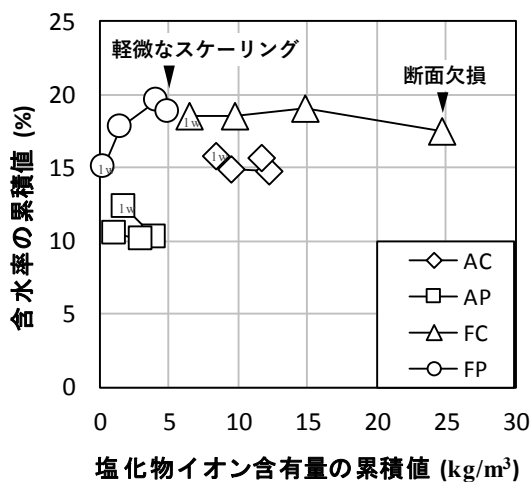


図-6 質量含水率の累積値と塩化物イオン含有量の累積値関係
(A: 塩害環境, F: 複合劣化環境, C: セメントモルタル, P: ポリマーセメントモルタル)

4. まとめ

本研究では、塩害と凍害の複合劣化環境における断面修復コンクリートの早期劣化の原因を把握するため、水分と塩化物イオンの移動を検討した。その結果、本研究の範囲では次のような知見を得ることができた。

- (1) 断面修復材が凍害を受けない条件で健全な場合は、緻密なものほど水や塩化物イオンのコンクリートへの移動抑制効果は大きい。
- (2) 塩害と凍害の複合劣化を受ける断面修復材を施工したコンクリート部材では、凍結融解作用によって含水率が增大し、凍害劣化が生じると塩化物イオンの浸透が大きくなる。
- (3) 凍結融解作用の有無にかかわらず、下面吸水の条件で含水率変化が小さい場合は、塩化物イオンの拡散は断面修復材の緻密性に依存する。

参考文献

- 1) コンクリート構造物のライフサイクルマネジメント 研究委員会：コンクリート構造物のライフサイクルマネジメントの現状把握と将来展望，日本コンクリート工学会北海道支部，pp.1-13，2012
- 2) 積雪寒冷地におけるコンクリート補修工法の設計施工に関する研究委員会：積雪寒冷地におけるコンクリート補修工法の設計施工に関する研究委員会報告書，日本コンクリート工学会北海道支部，pp.1-54，2016
- 3) 谷口智之，横田弘，橋本勝文：凍害劣化を考慮したモルタルへの塩化物イオン浸透予測手法の検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.15，pp.123-128，2015.10
- 4) 朴同天，兼松学，野口貴文：ポリマーセメントモルタルの吸水水分拡散特性および補修部位の拘束応力発生に関する研究，Concrete Research and Technology，Vol.18，No.18，pp.83-94，2007.5
- 5) Naito, I. and Taguchi, F.: A study on Re-deterioration of Surface-coated Sluice Structures due to Frost Damage, Proceeding of 7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures & Post-Conference Workshops, 2010
- 6) 槇島修，平間昭信，渡部正：各種断面修復工法の暴露試験による再劣化評価，とびしま技報，Vol.57，pp.43-47，2008
- 7) Lee, J. and Chang P.: Microstructure and Freeze-Thaw Resistance of Portland Cement Mortars, Journal of the Korean Ceramic Society, Vol.28, No.11, pp. 917-925, 1991
- 8) 酒井正樹，千歩修，長谷川拓哉，中野佑樹：乾燥を考慮したコンクリートの凍害劣化挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.945-950，2008.7
- 9) 鎌田英治，田畑雅幸，中野陽一郎：コンクリート内部の含水量の測定，セメント技術年報，No.30，pp.288-292，1978
- 10) 小池賢太郎，山口明伸，武若耕司，福重耕平：移流拡散方程式を用いたコンクリート中の塩化物イオン浸透モデルに関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.945-950，2014.7
- 11) Setzer, M.: Micro-Ice-Lens Formation in Porous Slid, Journal of Colloid and Interface Science, Vol.243, No.1, pp. 193-201, 2001
- 12) Setzer, M.: Mechanical stability criterion, triple-phase condition, and pressure differences of matter condensed in a porous matrix, Journal of Colloid and Interface Science, Vol.235, No.1, pp. 170-182, 2001