

論文 塩害環境下における凍害と ASR の複合劣化機構と表面含浸工法に関する検討

大谷 一将^{*1}・上田 隆雄^{*2}・中山 一秀^{*3}・塚越 雅幸^{*4}

要旨：寒冷地において凍結防止剤の散布される構造物では、凍害と ASR の複合劣化が生じる場合がある。本研究では、反応性骨材を含有する鉄筋コンクリート供試体を作製し、塩水の供給下での凍結融解と、促進 ASR を交互に繰り返すことで、塩害環境下における凍害と ASR の複合劣化機構を検討するとともに、シラン系含浸材を塗布した場合の効果を検討した。この結果、塩分を含有するコンクリートではスケーリングと鉄筋腐食の進行が顕著であり、シラン系含浸材塗布の効果は小さかった。一方、塩分無混入コンクリートでは、含浸材を塗布することで、凍結融解によるスケーリングや早期鉄筋腐食開始を防止できる可能性が認められた。

キーワード：スケーリング, ASR, 凍結融解, 鉄筋腐食, シラン系含浸材

1. はじめに

寒冷地において凍結防止剤の散布を受けるコンクリート構造物では、凍害とアルカリシリカ反応（ASR）の複合劣化が生じる場合がある¹⁾。すなわち、凍結防止剤として NaCl が供給されると、コンクリート表面のスケーリングが促進されるとともに、アルカリ金属イオンである Na⁺が浸透することで ASR による膨張を促進することが考えられる。既往の検討²⁾では、ASR が生じたコンクリートに凍結融解が繰り返し作用すると、凍結融解単独の時よりも激しいスケーリングが生じ、低温下でも継続して膨張が生じることが報告されている。このような複合劣化機構に関する検討は少なく、また凍害や ASR を伴う複合劣化がその後の鉄筋腐食に与える影響については明らかにされていないのが現状である。

このような複合劣化構造物に対する対策工法の一つとして、コンクリートの表層を改質する表面保護工法が考えられる。表面保護工法の中でもシラン系含浸材を用いた表面含浸工法は近年注目され、多くの施工実績を有している。この工法は塩害や ASR の単独劣化に対して有効な工法³⁾と考えられているが、複合劣化に対する効果は未だ不明な部分が多く、シラン系含浸材の適用条件を明確にするための検討が求められている。

そこで本研究では、反応性骨材を含有する鉄筋コンクリート（以下 RC とする）供試体を用いて塩水の供給を伴う凍結融解試験と ASR 促進試験を繰り返し実施した。これにより凍害と ASR の複合劣化によるコンクリートの劣化状況とそれに伴う鉄筋腐食状況を確認するとともに、シラン系含浸材を塗布含浸させた場合の劣化進行抑制効果を明確にすることを本研究の目的とした。

2. 実験概要

2.1 コンクリート配合

本実験で用いたコンクリートの配合、フレッシュ性状と材齢 28 日圧縮強度を表-1 に示す。水セメント比は 55%で一定とし、非反応性骨材のみを用いたコンクリートを N, 反応性骨材と非反応性骨材を 7:3 で配合したコンクリートを R, R 配合の劣化を促進するために、初期混入 R₂O 量が 10.0 kg/m³ となるように NaCl を予め添加した配合を RCI とした。

セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16 g/cm³, 比表面積：3280 cm²/g, R₂O：0.56%）を用いた。非反応性細骨材 S1 は、徳島県鳴門市撫養町産砂岩砕砂（表乾密度：2.56 g/cm³, F.M.：2.79）、反応性細骨材 S2 は、北海道産安山岩砕砂（表乾密度 2.56 g/cm³, アルカリ濃度減少量 Rc：108 mmol/l, 溶解シリカ量 Sc：444 mmol/l）を用いた。非反応性粗骨材 G1 は、鳴門市撫養町産砂岩砕石（表乾密度 2.55 g/cm³, Gmax：15 mm）、反応性粗骨材 G2 は、北海道産安山岩砕石（表乾密度 2.68 g/cm³, Gmax：15 mm, アルカリ濃度減少量 Rc：125 mmol/l, 溶解シリカ量 Sc：570 mmol/l）を用いた。

2.2 供試体の作製および養生

本研究で作製した RC 供試体は 100×100×300 mm の角柱コンクリートのかぶり 25 mm の位置に丸鋼φ13 mm を 1 本配したものとした（図-1 参照）。また、シラン系含浸材の含浸深さおよびスケーリングの測定のため、1 辺 100 mm の立方体無筋コンクリート供試体も別途作製した。これらの供試体はコンクリート打設翌日に脱型し、20℃の恒温室中で封緘養生を行った。14 日間の封緘養生終了後に、暴露面 1 面（型枠底面）を残して他の面にエ

*1 徳島大学大学院 先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻 建設創造システム工学コース（学生会員）

*2 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部社会基盤デザイン系教授 工博（正会員）

*3 徳島大学大学院 先端技術科学教育部知的力学システム工学専攻 建設創造システム工学コース（学生会員）

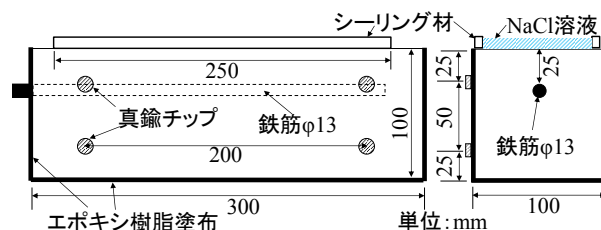
*4 徳島大学大学院 社会産業理工学研究部社会基盤デザイン系助教 工博（正会員）

表－1 コンクリートの配合および諸性状

配合名	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									スランブ (cm)	空気量 (%)	28 日強度 (N/mm ²)
			C	W	S1	S2	G1	G2	NaCl	AE 減水剤	AE 剤			
N	55	48	324	178	848	—	887	—	—	1.5	0.02	9.0	4.0	45.1
R			324	178	249	581	276	644	—	1.5	0.02	7.0	3.5	47.9
RCI			324	178	243	565	276	644	15.4	1.0	0.01	10.5	4.2	45.9

表－2 シラン系含浸材の含浸深さ

コンクリート配合名	塗布時の表面含水率(%)	含浸深さ(mm)
N	7.6	4.7
R	7.7	3.5
RCI	8.0	3.0



図－1 RC供試体概要図

ポキシ樹脂を塗布した後、コンタクトゲージ用の真鍮チップを側面2面に4個ずつ貼付した。

エポキシ樹脂の塗布と真鍮チップ貼付が終了した RC 供試体および立方体供試体の暴露面に対して、表面含水率の測定を実施し、8%程度になるまで気中乾燥を行った後に、全体の半数の供試体について、シラン系含浸材の塗布含浸を行った。塗布量は標準量である 200 g/m² とした。各配合コンクリートの塗布時の表面含水率と含浸深さの測定結果を表－2 に示す。なお、含浸深さの測定は JSCE-K 571-2013 に従って実施した。各配合コンクリートの供試体は、シラン系含浸材を塗布した供試体と無塗布の供試体をそれぞれ2体ずつ作製した。同一要因の供試体2体のばらつきは比較的小さいことから、本論文における実験結果は2体の測定値の平均値を示した。シラン系含浸材塗布後に、すべての供試体について20℃恒温室中で気中養生を1週間実施し、その後に塩水供給を伴う凍結融解試験に供した。

2.3 劣化促進試験および各種測定

RC供試体および立方体供試体の暴露面に対して、NaCl 溶液の貯水供給を行うためにシリング材を用いて高さ約8 mmの土台を作製した（図－1参照）。NaCl溶液の濃度は過去の検討結果⁴⁾より、スケーリング促進効果が大きいと考えられる3%を採用した。凍結融解方法はASTM C 672に準拠し、恒温低温試験槽による温度制御を行った。凍結過程は-18℃で凍結時間16時間、融解過程は最高温度23℃で融解時間8時間とし、24時間で1サイクルとなるように設定して計30サイクル行い、その後供試体を促進ASR環境に移した。促進ASRは、供試体の全体を湿布で覆い、ジップ付きのビニール袋中に密封した状態で温度40℃環境に30日間保管した。促進ASR試験後は再び凍結融解試験を行い、2つの保管環境を交互に3回繰り返した。

凍結融解期間中は7サイクル毎にRC供試体および立方体供試体を用いてスケーリング量を測定し、凍結融解試験および促進ASR期間終了時には、RC供試体を用いてコンクリート膨張率、供試体側面間の超音波伝播速度、コンクリート中鉄筋の自然電位、分極抵抗、コンクリート抵抗をそれぞれ測定した。コンクリート膨張率および鉄筋の電気化学的腐食指標値を測定する前日には、すべての供試体を湿潤状態のまま20℃の恒温室に移動した。コンクリートの長さ変化は、コンタクトゲージにより測定した。また、暴露面および暴露面反対側の面から15 mm 深さの側面中央に設置したセンサーで測定した、側面間の超音波伝播速度の値から、換算式⁵⁾により相対動弾性係数を算出して各測定点近傍のコンクリート内部劣化状況を評価した。電気化学的鉄筋腐食指標の測定を行う際の照合電極は、飽和銀塩化銀電極 (Ag/AgCl)、対極にはチタンメッシュを用いて、供試体中の鉄筋全長の平均値として測定を行った。分極抵抗は矩形波電流分極法で印加電流10 μA、周波数800 Hzと0.1 Hzのインピーダンス値の差から求め、コンクリート抵抗は高周波数側(800 Hz)のインピーダンス値として求めた。

3. RC 供試体の外観状況

30 サイクルの凍結融解と30日間の促進ASRを1セット（促進劣化日数60日）および3セット目の凍結融解（促進劣化日数150日）終了後のRCI配合のRC供試体暴露面の状況を図－2 および図－3 にそれぞれ示す。なお、他の配合コンクリートの場合は、軽微なスケーリングが見られた程度であり、ここでは顕著な外観劣化が認められたRCI配合の供試体の状況を示す。ここで示した写真は各供試体の暴露面（250×100 mm）全体を上から

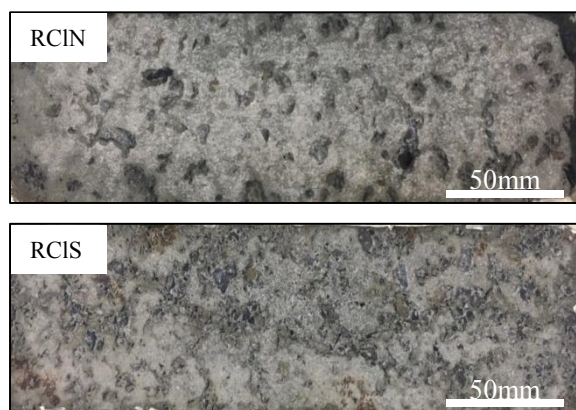


図-2 凍結融解と促進 ASR を 1 セット終了後の RC 供試体暴露面の状況

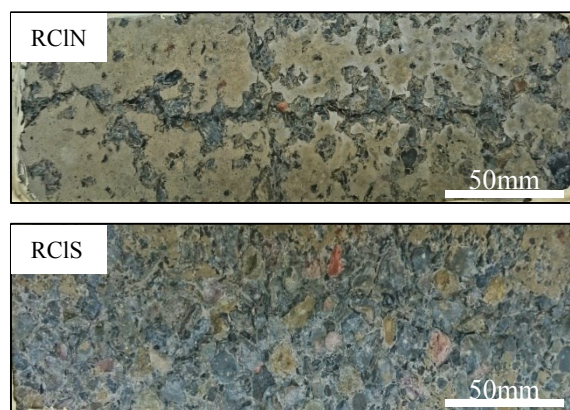


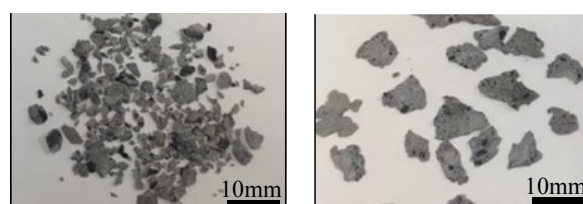
図-3 凍結融解と促進 ASR を 2 セットと 3 セット目凍結融解 30 サイクル終了後の RC 供試体暴露面の状況

撮影したものである。また、写真とともに示した供試体名は表-1 に示したコンクリート配合名の後に N か S を付しており、シラン系含浸材無塗布の場合を N、塗布した場合を S とした。すなわち、RCIN は RCI 配合でシラン系含浸材無塗布の供試体を意味する。

図-2 より、促進劣化 1 セット終了時点で RCIN の暴露表面は局部的に穴の開くような欠損が見られるが、シラン系含浸材を塗布した RCIS の場合には RCIN に比べ暴露面が広範囲に剥離した欠損が見られる。また図-3 より、促進劣化 3 セット終了時点では図-2 で見られたそれぞれの供試体におけるスケーリング状況がさらに欠損箇所の深さ方向に進行することで、骨材が表面に露出するとともに、写真の水平方向に鉄筋軸に沿ったひび割れが顕在化していることから、コンクリート中で鉄筋腐食が進行しているものと考えられる。ただし、明確な錆汁の滲出は認められず、ひび割れの主原因が ASR による膨張である可能性もある。

RCIN および RCIS の RC 供試体から採取されたスケーリング片の外観を図-4 に示す。特に 1 セット目の凍結融解期間中に採取されたスケーリング片は、シラン系含浸材塗布の有無によって異なり、RCIN の場合には細かく粉砕されたようなものが多いのに対して、RCIS の場合は薄片状のものが多かった。これに対して、3 セット目の凍結融解期間では、いずれの場合にも、コンクリート内部から剥離したような骨材を含む大きなスケーリング片が目立つようになった。

遠藤らは、シラン系含浸材を塗布したコンクリートの凍結融解によるスケーリング状況を検討^{6),7)}しており、本研究でも見られたように、凍結融解初期ではスケーリングの発生を抑制できるものの、ある程度劣化が進行すると、急速にスケーリング量が増大することを報告している。この理由として、シラン系含浸材の含浸層部分の透水性が小さいため、内部（含浸層背面）からの水圧が



(a) RCIN (1 セット目) (b) RCIS (1 セット目)



(c) RCIS (3 セット目)

図-4 採取されたスケーリング片

大きくなることを挙げている。本検討の場合も、内部に含有する NaCl の影響でスケーリングの発生しやすい状況であり、表層の含浸層を剥離させるような浸透圧あるいは水圧が内部からかかったものと推察される。

4. 凍結融解によるスケーリング

30 サイクル 1 セットの凍結融解を 3 セット行った時の RC 供試体と立方体供試体の累計スケーリング量の経時変化を図-5 および図-6 にそれぞれ示す。図にも示したように、30 サイクルの凍結融解期間の間に 30 日間の促進 ASR 期間が入っている。図-5 によると、RCIN では、凍結融解開始直後からスケーリングが発生している。RCI 配合は、練り混ぜ時に多量の NaCl を初期添加しており、暴露表面から塩水が浸透する前から、内在する NaCl の影響でスケーリングが進行しやすい状況が形成されていたと言える。また、RCI 配合でも、凍結融解初期においては、シラン系含浸材を塗布することによってスケーリングの発生が抑制されているが、20 サイクルを超え

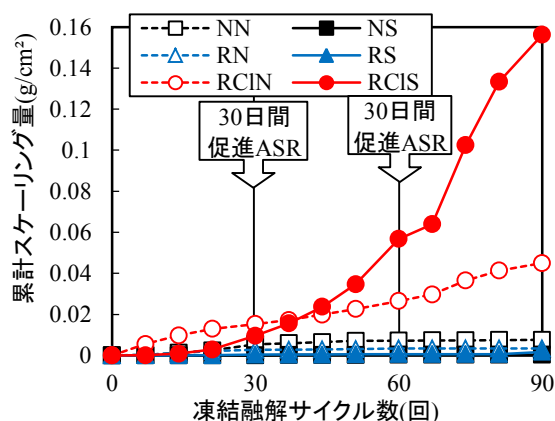


図-5 RC 供試体の累計スケーリング量の経時変化

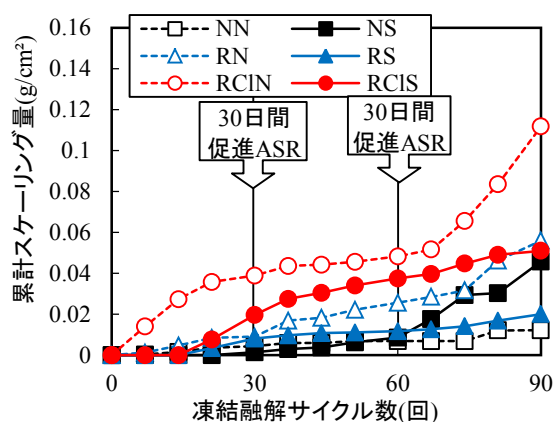


図-6 立方体供試体の累計スケーリング量の経時変化

ると、RCIS のスケーリング量が急速に増加し、促進 ASR 試験 30 日後の凍結融解 37 サイクル目以降は最も累計スケーリング量が多くなっている。同様の状況は遠藤らの検討⁶⁾でも確認されており、前述したように、シラン系含浸材の含浸層が広範囲で剥離した後に、脆弱化した表層においてスケーリングが急速に進んだものと考えられる。なお、N 配合と R 配合については、シラン系含浸材を塗布した NS と RS はほとんどスケーリングが見られないが、NN で若干スケーリングが進行していることから含浸材の塗布により、外部からの NaCl 溶液の浸透を防止しているものと考えられる。

一方、図-6 によると、立方体供試体のスケーリングの進行の様子は RC 供試体の場合と若干異なっており、N 配合と R 配合は、図-5 に示した RC 供試体の場合よりもスケーリングが促進されている。これは、立方体供試体は RC 供試体よりも寸法が小さいため、凍結融解による温度変化が供試体全体に影響しやすいことによるものと考えられる。一方、RCI 配合では、シラン系含浸材を塗布した RCIS のスケーリングが RC 供試体の場合ほど増大していない。これは、RC 供試体の場合には、

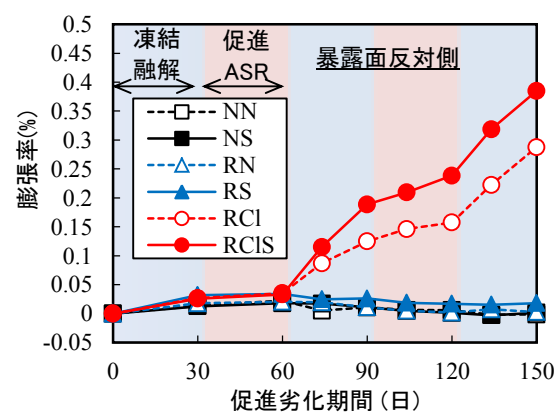
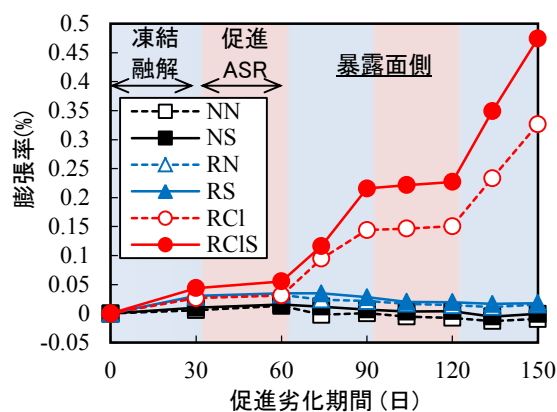


図-7 コンクリート膨張率の経時変化

鉄筋腐食による膨張圧の影響で、より広範囲で表層の含浸層が剥離したことが原因と考えられる。

5. コンクリート膨張率と相対動弾性係数の経時変化

凍結融解と ASR の繰返し促進劣化を行った RC 供試体のコンクリート膨張率経時変化を図-7 に示す。図-7 上図は図-1 において暴露面に近い位置の膨張率、下図は暴露面から遠い位置の膨張率を示している。初期に NaCl を添加していない R 配合については、凍結融解期間中に外部から浸透する NaCl によって、その後の ASR が進行することになるが、図-5 に示したようにスケーリング量も比較的小さいことから、NaCl 溶液の浸透もコンクリート表層部分に限定されており、ASR による膨張は小さいものと考えられる。

これに対して、RCI 配合は初期混入 NaCl により、ASR の進行に必要なアルカリは供試体全体に供給された状態であるが、大きな膨張率の増進は促進 ASR 期間よりはむしろ凍結融解期間に見られる。凍結融解期間中の温度は最大でも 23℃であることから、凍結融解期間中のコンクリート膨張の主原因は、ASR よりも凍結融解作用によるコンクリート内部組織の脆弱化と吸水であるものと考えられる。これより、特にスケーリングが急速に進行した RCIS の膨張が大きくなったものと考えられる。

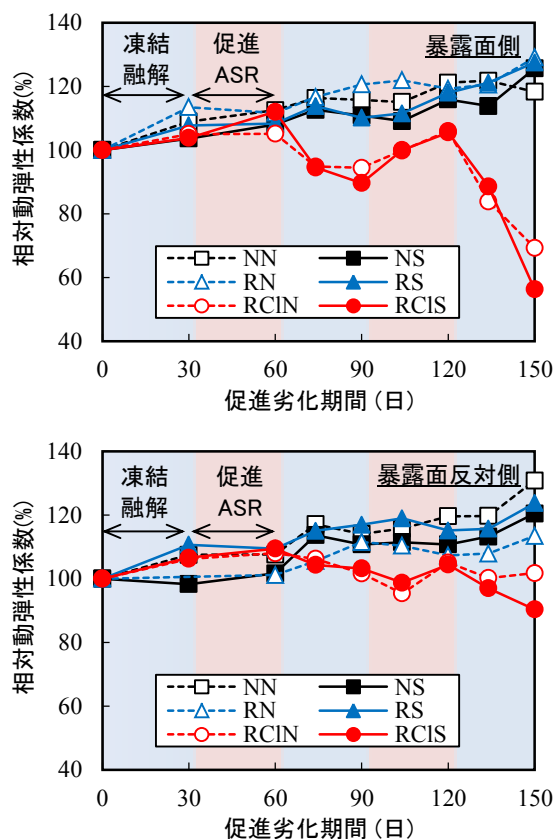


図-8 相対動弾性係数の経時変化

RCI 配合に関して、暴露面側では凍結融解期間中に大きく膨張するものの、促進 ASR 期間中の膨張率増進は暴露面反対側に比べて小さくなっている。これは、暴露面側では凍結融解期間中のスケーリングによるコンクリート細孔組織の脆弱化の影響が強く、促進 ASR 期間中に発生する ASR 膨張による圧力が緩和されたものと推察される。これに対し、暴露面反対側はスケーリング進行位置から距離があるために促進 ASR 期間中も ASR に起因するコンクリート膨張が大きくなった可能性がある。

図-7 と同様に、暴露面側および暴露面反対側で測定された供試体側面間コンクリートの相対動弾性係数の経時変化を図-8 に示す。全体的な傾向としては、スケーリングやコンクリート膨張率経時変化の場合と同様に、N 配合や R 配合ではシラン系含浸材塗布の有無に関わらず、相対動弾性係数の大きな低下は見られない。一方、RCI 配合の暴露面側の値は、暴露面反対側に比べて変化の幅が大きく、凍結融解期間中は減少し、促進 ASR 期間中は増加している。凍結融解期間中はスケーリングの影響でコンクリートの内部組織が脆弱化していることを表しており、促進 ASR 期間中は ASR 膨張による劣化進行よりもアルカリシリカゲルによる空隙充填効果や高温高湿環境におけるセメント水和反応の促進効果の方が大きかったものと推察される。これに対して、暴露面反対側の相対動弾性係数は、暴露面側に比べて凍結

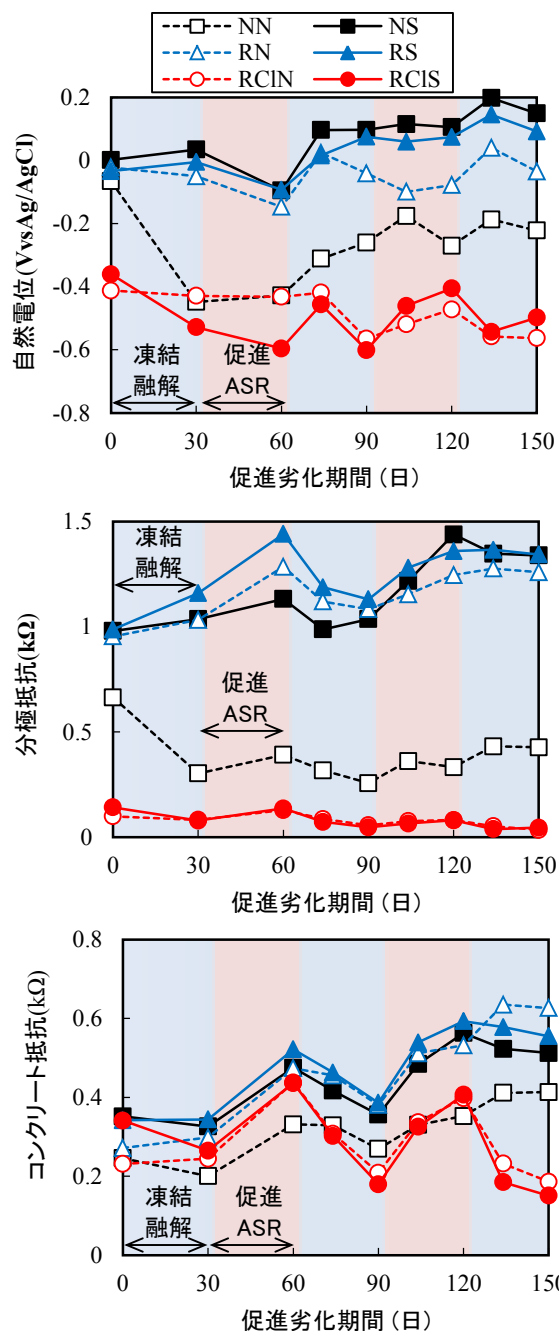


図-9 劣化促進期間中における電気化学的鉄筋腐食指標の経時変化

融解期間中の減少幅、促進 ASR 期間中の増加幅ともに小さく、全体的に徐々に減少していることから、凍結融解と ASR 双方の影響を受けながら徐々に劣化が進行しているものと考えられる。

6. コンクリート中铁筋の電気化学的腐食評価

促進劣化を行った RC 供試体について、電気化学的鉄筋腐食評価指標の経時変化を図-9 に示す。自然電位の経時変化より、RCI 配合供試体は、初期混入 Cl^- によって腐食状態 (ASTM C876-91 を参照) の電位で推移して

いる。シラン系含浸材を塗布した RCIS は、コンクリート中の水分蒸発を促す効果が期待できるが、今回の凍結融解および促進 ASR 環境条件は、いずれも湿潤環境であることから、シラン系含浸材の効果が発揮されるには不利な条件と言える。N 配合については、シラン系含浸材無塗布の NN の電位が経時的に低下し、ASTM C876-91 の腐食領域に達している。この供試体は図-5 に示したように、凍結融解期間中に若干のスケーリングが見られたが、わずかなスケーリングでも塩水浸透を顕著に促進し、鉄筋腐食が開始する場合があることを示しているものと思われる。なお、シラン系含浸材を塗布した NS については電位の低下は見られず、防食効果が持続している。一方で R 配合は、シラン系含浸材塗布の有無に関わらず、貴な電位を推移している。著者らは、外来塩による塩害と ASR の複合劣化の検討結果として、コンクリート表面からのアルカリの浸透で ASR による膨張が顕著でない場合には、アルカリシリカゲルによる空隙の充填によると考えられる物質移動抵抗性の向上が見られることを指摘した⁸⁾。本研究の場合にも、R 配合コンクリートの膨張は小さいものの、表層部分で ASR は進行しており、アルカリシリカゲルによる充填効果で細孔組織が緻密化され、 Cl^- 浸透速度が抑制された可能性がある。

鉄筋分極抵抗の値は自然電位の値との相関性が見られ、自然電位が卑であるほど、分極抵抗の値も小さく、鉄筋腐食速度は大きいものと推定される。コンクリート抵抗はかぶりコンクリートの電気抵抗であるが、促進劣化開始時点で、各配合供試体のコンクリート抵抗はシラン系含浸材の塗布によって増大していることがわかる。これにより、シラン系含浸材を塗布することによって、コンクリート表層部分が改質されたことがわかる。ただし、RCIS については、凍結融解期間中のスケーリング量が大きかったことから、1 セット目の凍結融解終了時点でコンクリート抵抗が大きく低下し、その後はシラン系含浸材無塗布の RCIN と同程度の値となっている。すなわち、コンクリート中に多量の Cl^- を含有するような厳しいスケーリング環境においては、早期にシラン系含浸材によるコンクリート表層保護効果が失われるものと考えられる。また、促進 ASR 期間中はすべての供試体でコンクリート抵抗の増大が見られる。これは高温湿潤環境における、セメントの水和反応進行と、アルカリシリカゲルによる空隙充填効果によるものと考えられるが、今後 ASR がさらに進行し、コンクリート膨張に伴うひび割れが顕在化すると、コンクリート抵抗の値は低下するものと予想される。

今後はさらに長期的な測定を継続し、最終的には鉄筋腐食状況を確認する予定である。

7. まとめ

本研究結果をまとめると次のようになる。

- (1) R_2O 量が 10.0 kg/m^3 となるように NaCl を初期混入した反応性骨材含有コンクリートである RCI 配合は、他のアルカリ無混入の場合と比較して凍結融解に伴う大きなスケーリング量が測定された。
- (2) RCI 配合にシラン系含浸材を塗布した場合、凍結融解初期のスケーリング量は抑制されたものの、20 サイクルを超えてから急速にスケーリング量が増大した。
- (3) 凍結融解と促進 ASR を繰り返した結果、暴露面付近のコンクリート膨張は凍結融解期間中のスケーリングの影響が大きく、暴露面反対側の膨張はスケーリングと ASR 双方の影響を受けたものと推測された。
- (4) N 配合で含浸材無塗布の場合、凍結融解期間中のスケーリング量は比較的小さかったが鉄筋自然電位は早期に卑変し、分極抵抗も低下した。これに対して、含浸材を塗布した場合には防食効果が持続した。一方、R 配合の場合には、含浸材塗布の有無に関わらず、鉄筋腐食傾向は認められなかった。

参考文献

- 1) 鳥居和之、笹谷輝彦、久保善司、杉谷真司：凍結防止剤の影響を受けた橋梁の ASR 損傷度の調査、コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 579-584, 2002.7
- 2) 小林孝一、鹿野裕、六郷恵哲：山間寒冷地における RC 床板の ASR と凍害による複合劣化の事例とその検証実験、土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 70, No. 3, pp. 320-335, 2014.
- 3) 野島昭二、宮永憲一、宮原茂禎、丸屋剛：各種対策工によるアルカリシリカ反応の膨張抑制効果に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 928-798, 2012.
- 4) 遠藤裕丈：なぜ、塩化物水溶液はコンクリートの塩害劣化を促進させるのか？、北海道開発土木研究所月報, No.582, pp. 31-34, 2001.11
- 5) 緒方英彦、服部九二雄、高田龍一、野中資博：超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価、コンクリート工学年次論文集, Vol. 24, No. 1, pp. 1563-1568, 2002.7
- 6) 遠藤裕文、田口史雄、谷本俊充：寒冷環境下におけるシラン系表面含浸材によるコンクリートの保護効果に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 2081-2086, 2006.6
- 7) 遠藤裕丈、田口史雄、林 大介、坂田 昇：浸透性吸水防止材を塗布したコンクリートのスケーリング特性、コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, pp. 987-992, 2004.6
- 8) 上田隆雄、甲把浩基、七澤 章、塚越雅幸：長期的に外来塩の供給を受ける鉄筋コンクリートの塩害と ASR の複合劣化、土木学会第 71 回年次学術講演会講演概要集, V-528, 2016.9