

研究委員会 鉄筋コンクリート構造物の複合劣化機構の解明とその対策に関する研究委員会

宮里 心一^{*1}・伊藤 始^{*2}・斎藤 豪^{*3}・上原子 晶久^{*4}・松沢 晃一^{*5}・宮本 慎太郎^{*6}

要旨：複合劣化が生じた鉄筋コンクリートでは、単独劣化と比較して、進行速度が速くなる場合がある。しかしながら、2000～2001年度に日本コンクリート工学協会で検討された「複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会」以降、体系的に整理されていない。そこで本委員会では、2002年以降に明らかにされた、中性化と塩害、塩害と凍害、塩害とASR、凍害とASR、およびDEFとASRによる複合劣化に関する研究成果や調査結果を整理した。その後、複合劣化の進行機構、実構造物における複合劣化の実態調査、複合劣化に対する補修補強の実績を精査した。さらに、進行機構を踏まえた対策についても考察した。

キーワード：複合劣化、進行メカニズム、実態調査、対策実績、予防保全、事後保全

1. はじめに

複合劣化が生じた鉄筋コンクリートでは、単独劣化と比較して、進行速度が速くなる場合がある。この様な変状は、老朽化が社会問題となってきた現代、実構造物においても増加している。そこで、土木学会コンクリート標準示方書や日本建築学会建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事では、「複合劣化に留意すべき」旨が記されている。しかしながら、2001年に成果報告された「複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会」（この報告書を「複合劣化報告書2001」と略す）以降の知見は、体系的に整理されていない。

したがって、本研究委員会では、最新の研究成果も含めて、土木構造物や建築物で生じた複合劣化の実態を踏まえた上で、材料科学的考察も加味してメカニズムを解

明し、その劣化を低減するために有効な予防保全方法ならびに事後保全方法を提案する。

上記の目的を達成すべく、はじめに、2002年以降に発表された複合劣化に関する知見を収集し、各委員が分担しながら統一書式に整理した。その後、表-1に示す二つのWGを立ち上げた。本稿では、図-1に示すように、材料科学WGの成果を第2章に、対策WGの成果を第3章に示す。さらに、第4章では、両WGの相違点と合致

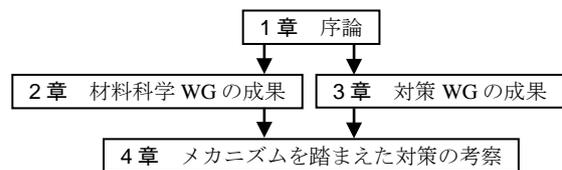


図-1 章立て

表-1 各WG委員構成

委員長：宮里 心一（金沢工業大学）		
【材料科学WG】		
◎斎藤 豪（新潟大学）	○宮本 慎太郎（東北大学）	
須田 裕哉（琉球大学）	高橋 佑弥（東京大学）	吉田 夏樹（日本建築総合試験所）
谷口 円（北海道立総合研究機構）	渡邊 賢三（鹿島建設）	
【対策WG】		
◎伊藤 始（富山県立大学）	○上原子 晶久（弘前大学）	○松沢 晃一（建築研究所）
小林 浩之（ナカポーテック）	権代 由範（仙台高等専門学校）	近藤 拓也（高知工業高等専門学校）
崎原 康平（琉球大学）	松下 哲郎（竹中工務店）	櫻庭 浩樹（土木研究所）
野村 昌弘（野村昌弘の研究所）	松林 卓（前田建設工業）	山本 佳城（大成建設）
◎主査, ○副査		

*1 金沢工業大学 工学部環境土木工学科教授 博士(工学) (正会員)

*2 富山県立大学 工学部環境・社会基盤工学科教授 博士(工学) (正会員)

*3 新潟大学 工学部工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*4 弘前大学 大学院理工学研究科准教授 博士(工学) (正会員)

*5 国立研究開発法人建築研究所 材料研究グループ 博士(工学) (正会員)

*6 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻助教 博士(工学) (正会員)

点を整理したうえで、メカニズムに則った対策について考察した。

2. 複合劣化のメカニズム

2.1 本章の位置付け

複合劣化はいくつかの劣化現象が複合して生じるものである。また、実構造物にて観察される劣化は、いくつかの劣化現象が複合して生じているものが多い。複合劣化には、いくつかの劣化現象が単独で同時に作用するような相加的な劣化過程を辿るものや、いくつかの劣化が互いに影響を及ぼし合うことで相乗的に劣化が進行していくものなど、様々な進行過程が存在する。本章では、i) 中性化と塩害、ii) 塩害と凍害、iii) 塩害とアルカリシリカ反応 (ASR)、iv) 凍害と ASR、v) DEF と ASR、による 5 つの複合劣化を対象に取り上げ、両者の影響が複合劣化の進行過程に及ぼす影響について整理した。

2.2 中性化と塩害による複合劣化

中性化が塩害に及ぼす影響として、セメント硬化体の相組成の変化とそれに伴う固定量の変化については定量的な評価が加えられている。フリーデル氏塩のモノカーボネートへの変化は液相中の pH や Cl⁻濃度、CO₃²⁻濃度に依存する。さらには、熱力学的相平衡計算に基づけば、C-S-H の Cl⁻の固定化についても中性化は影響を及ぼし、pH の変化による液相中の Cl⁻濃度の増加などについても熱力学的相平衡計算で示されている。

一方で、コンクリート内に存在する塩害が中性化に及ぼす影響としては、Cl⁻をはじめとした各種イオンによる液相中のイオン強度の変化やアルカリの影響によりセメント水和物に変化が生じ、これらの影響によって中性化速度や中性化後の空隙構造などに影響を及ぼす。また、外来塩分由来の塩害と中性化による複合劣化の場合は、Cl⁻とともにコンクリート中に浸透する水分の影響によって中性化の速度が大きく異なり、その水分の影響が中性化に与える影響が大きいため、現状としては外来塩分単味の影響として評価することは困難となっている。

2.3 凍害と塩害による複合劣化

凍害と塩害の複合劣化について、これらの劣化は同時に進行することが予想される。その影響を順序立てて検討し、主要因を明らかとすることは困難である。

このような現状において、本研究委員会では、塩害が凍害に及ぼす影響について、塩化物イオンが存在することで凍害の進行に影響がある点について、そのメカニズムを整理した。塩化物イオンを含む溶液を吸水した状態で凍結融解の繰り返しを受けると、非常に激しいスケールリング劣化が生じる。この要因は、浸透圧、飽水度の上

昇、熱衝撃、層間凍結による応力が発生するとされている。さらには、これらに加え、凍結した溶液の挙動が真水と大きく異なることも指摘されている。また、コンクリート中に内在塩として存在する塩分量が多くなると、内部劣化と表層劣化がともに促進される可能性がある点についても指摘されている。

次に、凍害が塩害に及ぼす影響として、まずは凍害による損傷が塩害を助長する点について整理した。凍害による損傷を供試体に与え、損傷度を相対動弾性係数の低下で評価したうえで、見かけの拡散係数との関係を観察すると、損傷の増大に伴い拡散係数が増大することが報告されている。

ただし、実環境下においては凍害と塩害が順序良く繰り返されるものではなく、凍結融解作用を受けながら凍結防止剤の散布などが行われる。凍結融解作用により塩分がコンクリート内部で濃縮されることや凍結による塩化物イオンの停滞も考えられるため、この様な複雑な点についても考慮していく必要がある。

2.4 塩害と ASR による複合劣化

塩害が ASR に及ぼす影響に関して、海水や凍結防止剤中のアルカリだけでなく、塩化物イオンも ASR の劣化機構に関与しており、水和生成物とのイオン交換による細孔溶液の pH の増大や細孔溶液中のイオン強度に影響し Si の溶解度を増加させることも報告されている。また、ASR ゲルの組成が外来から供給される NaCl の存在によって異なることも指摘されており、Cl⁻による作用が ASR の発生から ASR ゲルの膨張特性にも影響を及ぼしていると考えられる。したがって、外来因子の浸透抑制の対策としてコンクリートの組織を緻密化させる混和材の効果は大きく、多くの研究者によって ASR の抑制効果が報告されている。

ASR が塩害に及ぼす影響について、ASR に起因するひび割れによって塩分浸透抵抗性が低下し、これにより鋼材腐食が助長される。一方で、ASR に起因するひび割れ発生前であれば ASR ゲルの充填による組織の緻密化や鉄筋の不動態化が起こり鋼材腐食の抑制に寄与することも報告されている。ただし、ASR 進行によるひび割れの発生によって腐食の進行速度は増大することが予想され、ASR の進行に応じて評価することが重要である。また、実環境下では、ASR と塩害の劣化は同時に進行する場合が多く、ASR と塩害の複合劣化メカニズムからも、個々の劣化を促進させることが想定され、両者の劣化が複合的に作用する環境では、それぞれの劣化進行に留意する必要があると考えられる。

2.5 凍害と ASR による複合劣化

ASR の後に凍害が生じた場合には、凍害の進行速度が大きくなる傾向にある。この主な要因として、ASR によるひび割れにより水分等の劣化因子の浸透が促進されることと、ASR 生成物が空隙や空気泡に侵入することで膨張圧緩和機能が低下することが考えられる。一方、凍害の後に ASR が生じた場合には、ASR 膨張速度に大きな変化は見られず、凍害が ASR に及ぼす影響は限定的であると考えられる。

凍結防止剤を散布するような寒冷地域の実環境を考えると、夏季には ASR が進展し、冬季に凍害が進展するため、ASR と凍害が交互に進展するような環境が現実的であると考えられる。このような場合の劣化進展について考えると、ASR が凍害を促進させることで ASR と凍害の複合劣化はそれぞれ単体の劣化に比べて劣化速度は大きくなると考えられる。実際に凍結融解と ASR 促進を交互に作用させた複数の実験があり、単体の劣化の足し合わせよりも膨張や劣化が促進している様子が観察されている。例えば、Deshenes ら¹⁾は、21 日サイクルの中で ASR 促進のみ、凍結融解のみ、ASR 促進と凍結融解の複合をそれぞれ作用させた角柱試験体の膨張挙動を計測しており、単体劣化に比べて複合劣化の方が大きな膨張量となることを報告している。

2.6 DEF と ASR による複合劣化

DEF による劣化の概念が認識されるよりも以前から、ASR が生じたコンクリートのひび割れや空隙中にエトリンサイトが認められるケースが報告されていた。このようなケースもあり、DEF と ASR が同時に生じたコンクリートについて、ASR が劣化の主要因であり、DEF の影響は限定的とする事例が報告されている。ただし、近年の DEF に関する研究成果を勘案すると、必ずしも DEF との複合劣化を否定できるものではないとの指摘もある。

その一つとして、例えば DEF が ASR のトリガーになるとの説がある。これは、エトリンサイトの生成により液相中の Ca イオンが消費されるとポルトランドイトが溶解し、細孔溶液の pH が上昇することで ASR が促進されるという仮説である。

一方で、ASR が DEF のトリガーになるとの説もある。これに関しては、例えば ASR ゲルの生成により OH⁻が消費されると、エトリンサイトが生成されやすくなるとの考察や、ASR ゲルの生成によりシリケートイオン濃度が低くなるとエトリンサイトが生成しやすくなるとの考察が報告されている。

また、膨張率に着目すると、ASR と DEF の複合劣化を想定したコンクリート試験体の膨張率は、ASR のみを想定した試験体の膨張率と同程度との報告がある。また、

DEF のみを想定した試験体より低い膨張率であったことも報告されている。

しかしながら、DEF と ASR の複合劣化メカニズムに関する論争は未だに解決していないことや、DEF と ASR の複合劣化と物理的変化との関係について実験データが不足しているなど、今後の課題が多分に残されているのが現状であり、当該研究の今後の発展に期待したい。

3. 複合劣化の実態対策

3.1 概要

鉄筋コンクリート構造物における劣化調査において、特定した劣化要因のほかに劣化要因が潜んでいることや、それらが並列して生じていることを認識できなかった場合には、劣化進行や健全度を見誤るとともに、補修後に再劣化を生じることが考えられる。劣化要因が複合しているかを認識し、対策として単独劣化と同様に扱うことができるかを判断することで、劣化速度や劣化症状を制御するとともに、補修後の再劣化を防止することができる。前述の複合劣化報告書 2001 では、塩害・中性化・凍害・ASR が複合する関係においては、すべての関係が相乗的複合劣化と因果的複合劣化に区分され、相乗関係や因果関係を特定することが合理的かつ経済的で、効果的な劣化対策の選定につながるとしている。

このことから 3 章では、図-2 のように複合劣化の関連性が強い、「塩害と中性化 (2 節)」、「塩害と凍害 (3 節)」、「塩害と ASR (4 節)」、「凍害と ASR (5 節)」を対象とした。各複合劣化の調査では、複合劣化報告書 2001 の発刊以降における実構造物での発生事例や研究としての検討事例を対象として分析し、「概要」、「実構造物における劣化事例」、「実構造物における対策と効果」、「研究されている対策」、「展望」の順で整理した。加えて、一部の複合劣化の種類では、「構造成能への影響」や「劣化予測」についても整理した。

本章で取り上げる 61 件の劣化事例と対策事例は、最終報告書においては、表-2 に示すような一覧表にて整理している。この表のとおり、構造物の種類と複合劣化種類を対応させるとともに、地域、環境状況、点検・調

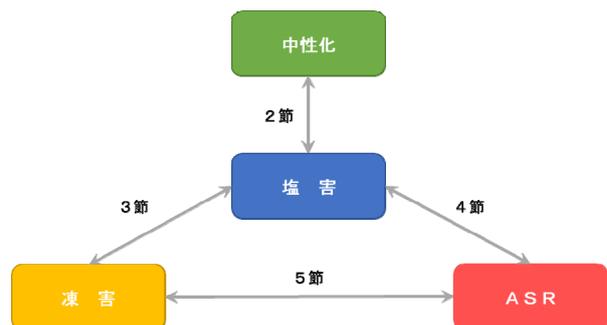


図-2 3章で対象とした複合劣化の種類と節構成

表-2 劣化事例と対策事例の一覧表（抜粋）

	複合劣化の種類	構造物部材	区分				
			地域	環境状況	点検項目 調査項目	対策	追跡調査の有無
1	塩害＋中性化	鉄道橋	近畿・中国地方	海砂使用	かぶり厚さ、中性化深さ、塩化物イオン量、鉄筋腐食度、鉄筋の降伏強度残存率・公称安全率	電気防食	あり
2	塩害＋中性化	橋脚	関東地方	部分的に海水に接する	外観、塩化物イオン濃度、かぶり厚さ、鋼材の腐食グレード・自然電位、中性化深さ、塩化物イオン濃度、鉄筋の腐食グレード	RC巻立て、断面修復	なし
3	塩害＋中性化	棧橋	中国地方	海上	中性化深さ、塩化物イオン濃度、鉄筋の腐食グレード	—	なし
4	塩害＋凍害	道路橋	北海道	沿岸・内陸	スケーリング劣化、塩分濃度、凍結防止剤散布量	劣化予測	なし
5	塩害＋凍害	床版	東北地方	内陸・疲労	ひび割れ密度、塩分濃度、圧縮強度、腐食度	超速硬セメントモルタル(試験)	なし
6	塩害＋ASR	橋台	北陸地方	海岸から数km	ひび割れ密度、塩分濃度、鉄筋腐食、水分量	—	なし
7	塩害＋ASR	橋梁・地覆	北陸地方	半島中部	ひび割れ幅、塩分濃度、鉄筋腐食	表面被覆、断面修復	あり
8	塩害＋ASR	橋脚	沖縄地方	海上	鉄筋腐食、塩分濃度、岩石分析	他橋梁の新設時にエボ筋＋FA	あり
9	凍害＋ASR	トンネル	北陸地方	山間部	中性化深さ、蛍光顕微鏡観察、偏光顕微鏡観察	—	なし
10	凍害＋ASR	電力施設	北陸地方	山間部	酢酸ウランル蛍光法、X線回折、コア残存膨張量試験、圧縮・静弾性係数	—	なし

査項目、対策、追跡調査の有無を示した。これらを基に、単独劣化との相違点、対策の長期的な効果、対策の適否や課題を整理した。その結果を踏まえて、課題の解決法、複合劣化の進行を低減する事後保全方法を考察した。加えて、複合劣化が懸念される地域において、新設時や更新時の長寿命化方法についても取り上げた。

次に、本章で取り上げる、研究として実績のある13件の対策事例を一覧表に整理した。ここでは、対策の方法と複合劣化の種類を対応させるとともに、対策区分、試験環境・供試体、主な試験項目、効果を示した。これらを基に、研究されている対策方法の特徴や適用範囲を整理した。その結果を踏まえて、複合劣化進行の低減に寄与する効果、実構造物への適用の可能性を考察した。

最後に、各種の複合劣化における展望では、調査の結果から建設年次や対策年次、地域の特徴、対策の今後の課題などに着目して分析することで、今後の調査診断や補修工法選定への活用方法を示すことを目標とした。さ

らにはコンクリート構造物の新規建設時における長寿命化の留意点を見出した。4つの複合劣化における調査結果の概要を3.2～3.5に記述する。

3.2 塩害と中性化による複合劣化

鉄筋コンクリート構造物に生じる塩害と中性化による複合劣化は、セメント水和物にフリーデル氏塩などとして固定化されている塩化物イオンが中性化によって細孔溶液中に遊離することで、細孔溶液中の塩化物イオン濃度が上昇し、中性化部分より奥に塩化物イオンが濃縮し、それが鉄筋周辺で生じた場合には塩害による単独劣化と比較して鉄筋の腐食が促進される。また、中性化による細孔溶液のpH低下が鉄筋の腐食開始を早める可能性もある。図-3に塩害と中性化による複合劣化の概略を示す。

本節では、実構造物における塩害と中性化の複合劣化について、建設当初からコンクリート中に塩化物イオン

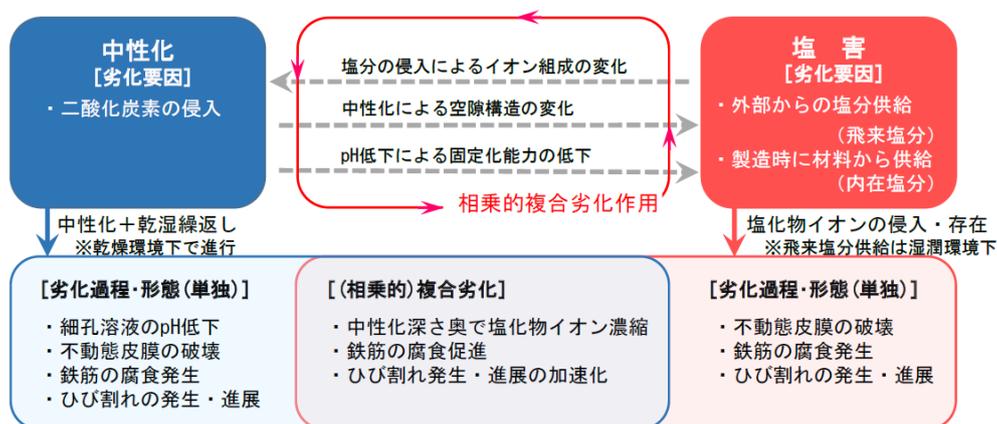


図-3 塩害と中性化による複合劣化の概略図

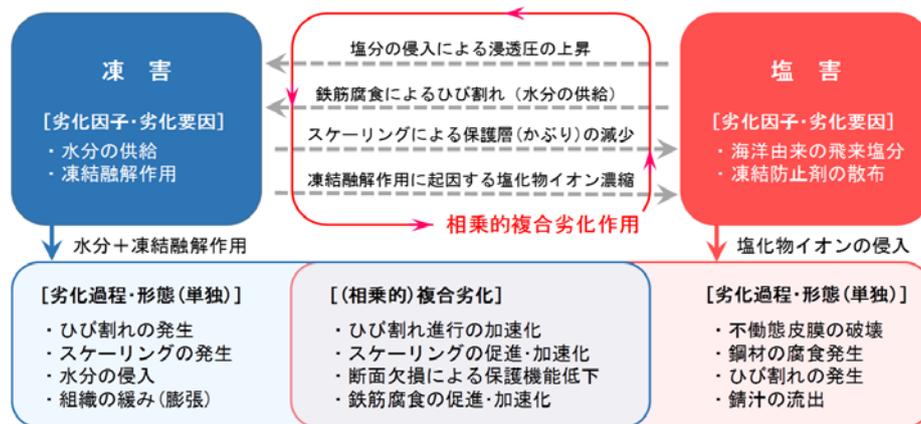


図-4 塩害と凍害による複合劣化の概略図

が内在していた鉄道構造物，建設後のコンクリート中に塩化物イオンが供給された港湾構造物に関する劣化事例，そして鉄道構造物に生じた複合劣化に関して，実際に行われた対策およびその後の追跡調査結果について述べた。また，実験室レベルで研究されている劣化対策として，コンクリートの練混ぜ時に混和材料や混合セメントを用いる予防保全としての対策，再アルカリ化工法や脱塩工法と電着工法を組み合わせ用いた事後保全としての対策，そして塩害や中性化による劣化の生じた構造物の余寿命を評価する手法について述べた。そして，最後にこれらを総括するとともに，塩害と中性化による複合劣化に関して，今後の展望を述べた。

3.3 塩害と凍害による複合劣化

鉄筋コンクリート構造物に生じる塩害と凍害による複合劣化は，相互の劣化作用が相乗的に作用することによって，劣化の進行が単独劣化の場合よりも加速される特徴がある。図-4に，塩害と凍害による複合劣化の概略を示す。劣化進行の支配的ルートは，凍結融解環境下にあるコンクリートに塩化物イオンが侵入することを起点とする。塩化物イオンの存在により凍結融解作用によって生じる浸透圧が上昇し，表層剥離現象であるスケーリ

ングが加速度的に進行する。スケーリングの進行は，断面欠損や組織的な緩みの発生などを伴い，コンクリート表層部(かぶり)の保護機能を低下させる。

この節では，文献調査から得られた知見をベースに，実構造物における劣化事例，実構造物における対策と効果，研究が進められている対策，および構造性能の評価について述べた。実構造物における劣化事例では，塩害と凍害による複合劣化の地域的な発生リスクについて解説した。関連して，比較的凍害危険度の低いとされる中国地方および九州地方における劣化事例を紹介した。実構造物における対策と効果では，表面含浸工法の試験施工における適用効果や断面修復工法の早期再劣化に関する事例に触れた。その他，研究が進められている対策や構造性能の評価についても解説した。

3.4 塩害とASRによる複合劣化

鉄筋コンクリート構造物に生じる塩害とASRによる複合劣化は，相互の劣化作用が相乗的に作用することによって，劣化の進行が単独劣化の場合よりも加速される。図-5に，塩害とASRによる複合劣化の概略を示す。塩害においてはコンクリート内部への塩化物イオンの浸透による鉄筋腐食，ASRにおいては反応性骨材とコンクリ

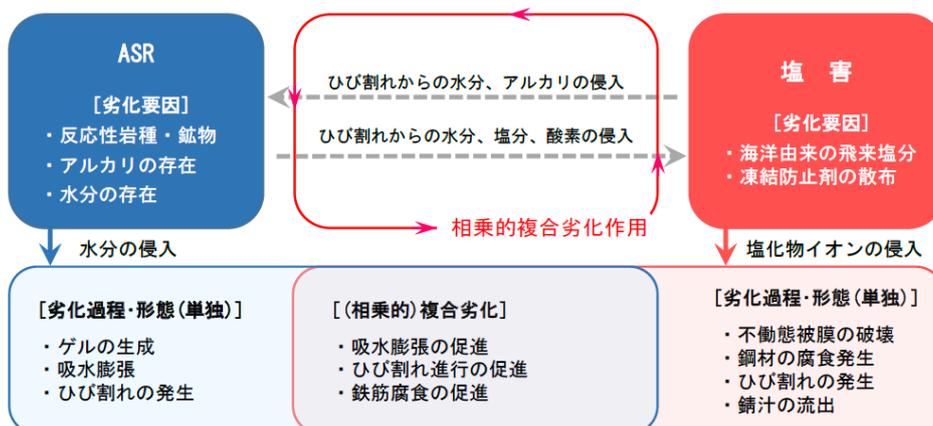


図-5 塩害とASRによる複合劣化の概略図

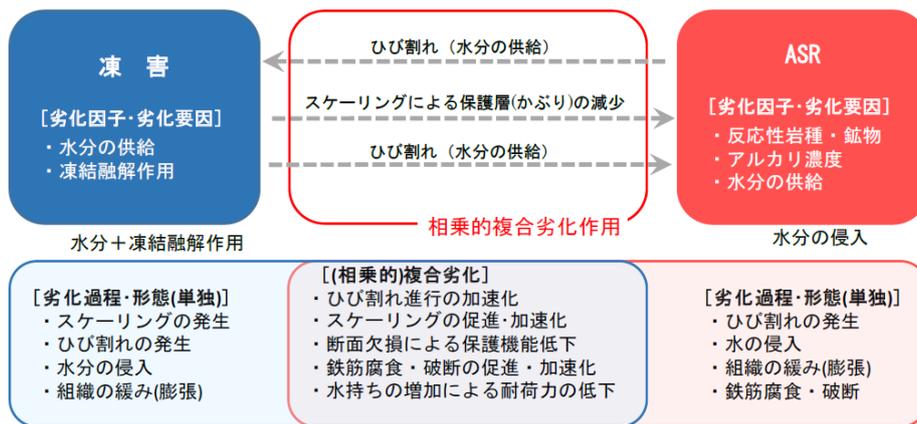


図-6 凍害と ASR による複合劣化の概略図

ート中のアルカリ水溶液の反応によるゲルの生成，いずれの単独劣化においてもコンクリートにひび割れが発生する。ひび割れが発生すると，ひび割れを起点として水分やアルカリが侵入することにより ASR の反応が促進されるとともに，ひび割れから水分，塩分，酸素が供給されることにより鉄筋腐食も促進される。これらの相乗的作用が連鎖的に起こり，コンクリート構造物の早期劣化現象として現れることとなる。

本節では，実構造物における塩害と ASR の複合劣化について，凍結防止剤の影響を受けた橋梁の ASR による損傷度を調査した事例，凍結防止剤の影響を受けた橋台の劣化の実態を調査した事例，および凍結防止剤が散布される表面保護工が適用された橋梁地覆部の事例について述べた。また，凍結防止剤が散布される橋梁地覆部に表面保護工を実施した事例，海上運河部に架かる橋梁に対して補修・補強設計を実施した事例およびかぶり厚さを大きく確保した長大離島架橋において変状が生じた事例について述べた。そして，研究されている対策として，予防保全対策の研究事例，断面修復工法の研究事例および電気化学的補修工法の研究事例について述べた。そして，最後にこれらを総括し，建設年や補修工法の観点から展望を述べた。

3.5 凍害と ASR による複合劣化

コンクリート構造物に生じる凍害と ASR による複合劣化は，相乗的複合劣化に位置付けられる。相互の劣化作用が相乗的に作用することによって，劣化の進行が単独劣化の場合よりも加速される。図-6 に，凍害と ASR による複合劣化の概要を示す。劣化進行の支配的ルートは，凍結融解環境下にあるコンクリートに水が侵入することを起点にする。水の存在により ASR によるひび割れの発生とともに凍結融解作用によって生じる浸透圧が上昇し，スケーリングが加速度的に進行する。また，保護機能の低下により腐食，膨張した鉄筋は，ひび割れを誘

発してコンクリート深部への水分供給を助長する。

本節では，文献調査から得られた知見をベースに，実構造物における劣化事例，実構造物における対策と効果について述べた。実構造物における劣化事例では，積雪寒冷地におけるトンネル，道路構造物などについて紹介した。実構造物における対策と効果では，凍結防止剤散布の散布が加わった環境における，表面被覆工法，連続繊維シート接着工法などの事例に触れた。さらに，研究が進められている対策では，塩害環境下におけるシラン系表面含浸材の効果について紹介した。

4. メカニズムを踏まえた複合劣化の対策方法

4.1 塩害と中性化の複合劣化

図-7 により，2 章で明らかにしたメカニズムと，3 章で確認された実構造物における調査結果を比較する。これによれば，複合劣化の進行は，メカニズムに則って，実構造物において進行することが確認できた。

このことを踏まえて，塩害と中性化による複合劣化に対して有効な保全方法を表-3 に示す。ここで，表中の

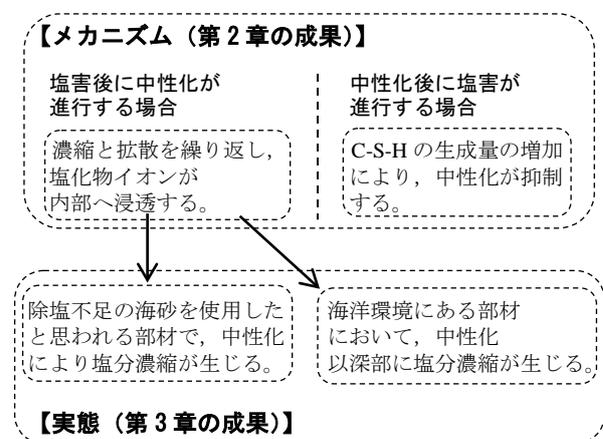


図-7 塩害と中性化の複合劣化に関するメカニズムと実態の関係

表-3 塩害と中性化の複合劣化に対する保全方法

No	区分	方法	A	B	C
1)	予防	カルシウムアルミネートの一種 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ (CA2) を混入したコンクリートを使用する。		レ	
2)		3成分系コンクリート (FA が 15~20%程度) を使用する。		レ	
3)		材料と施工の両面で、防水性の高い部材を建設する。			レ
4)	事後	複数の電気化学的補修工法を組み合わせる。	レ	レ	
5)		亜硝酸イオンを含む、物質透過性の低い材料により断面修復する。ただし、マクロセルの形成を防ぐ。			レ

【メカニズム (第2章の成果)】

NaCl 濃度 3% で激しいスケーリング劣化 (ソルトスケーリング) が発生する。

凍結防止剤を含む水が掛かる部位で著しい劣化が起きる。

【実態 (第3章の成果)】

図-8 塩害と凍害の複合劣化に関するメカニズムと実態の関係

表-4 塩害と凍害の複合劣化に対する保全方法

No	区分	方法	A	B	C
1)	予防	シラン系表面含浸工法を塗布する。	レ	レ	
2)		材料と施工の両面で、防水性の高い部材を建設する。			レ
3)	事後	高靱性材料を用いることで力学性能の回復も図れる。		レ	
4)		凍結融解抵抗性を有するポリマー含有材料で断面修復した上に、防水処理を施す。			レ

A は現場において実績のある方法, B は研究において検討された方法, C は本研究委員会で新たに提案する方法である。この表によれば, 5つの有効な保全方法が挙げられた。ただし, 1)の方法では, 捕捉した塩化物イオンが中性化でリリースされる可能性はあるので, モニタリングは重要である。また 2)の方法では, フライアッシュ (FA) の混和量が多いと, 中性化が促進する可能性がある。

4.2 塩害と凍害による複合劣化

図-8によれば, 複合劣化の進行は, メカニズムに則って, 実構造物においても進行していることを確認できた。

【メカニズム (第2章の成果)】

塩害後に ASR が進行する場合

低い pH と少ない物質透過により, FA が膨張を遅延させる。

凍結防止剤や海水から Na^+ が供給される。→ NaCl が反応性骨材中の Si の溶解量を増加させる。→ ASR が活発化する。

ASR 後に塩害が進行する場合

ASR ゲルが, 空隙の緻密化や鋼材の不働態化を一時的に起こす。

ASR のひび割れにより塩分供給量が増加する。

凍結防止剤が ASR を活発化する。

【実態 (第3章の成果)】

図-9 塩害と ASR の複合劣化に関するメカニズムと実態の関係

このことを踏まえて, 塩害と凍害による複合劣化に対して有効な保全方法を表-4に示す。なお, セメントモルタルを用いた断面修復工法では, 塩化物イオンが浸透しやすく, 比較的早期に再劣化することが, 現場の実績における追跡調査でも, 研究による検討でも, 確認されている。この理由は, 吹付された断面修復材にはエントレインドエアが入らないためと考えられる。このことから, 4)の方法においては, ポリマーがエントレインドエアの役割を果たすことを期待している。

4.3 塩害と ASR による複合劣化

図-9によれば, 複合劣化の進行は, メカニズムに則って, 実構造物においても進行していることを確認できた。言い換えれば, メカニズムとしては, 複合作用により劣化が抑制される可能性も指摘されていたが, 実構造物においては必ず促進されることが確認された。

このことを踏まえて, 塩害と ASR による複合劣化に対して有効な保全方法を, 表-5に示す。

表-5 塩害と ASR の複合劣化に対する保全方法

No	区分	方法	A	B	C
1)	予防	ASR にも塩害にも抑制対策として有効な FA を混和する。		レ	
		かぶり (厚さ) を増し, エボ筋を使用し, FA を混和する。	レ		
2)		材料と施工の両面で, 防水性の高い部材を建設する。			レ
3)	事後	ASR にも塩害にも抑制対策として有効な LiNO_2 を含浸させる。		レ	

4.4 凍害と ASR による複合劣化

図-10によれば、複合劣化の進行は、メカニズムに則って、実構造物においても進行していることを確認できた。

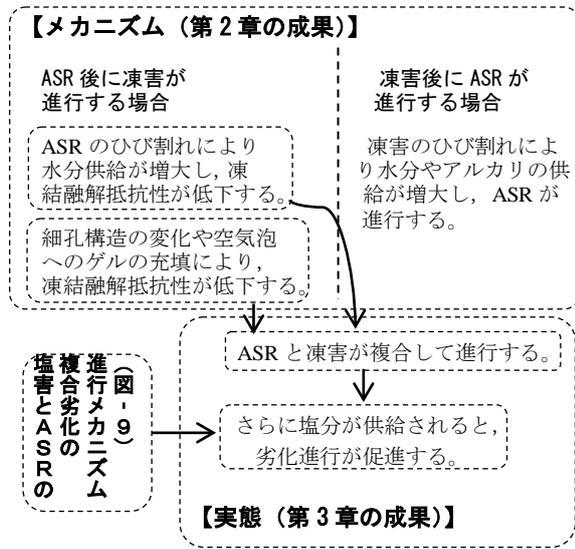


図-10 ASRと凍害の複合劣化に関するメカニズムと実態の関係

このことを踏まえて、凍害とASRによる複合劣化に対して有効な保全方法を、表-6に示す。この表によれば、5つの有効な保全方法が挙げられた。なお、5)について

は、亜硝酸には保水性があるため、凍害を促進する可能性も考えられる。さらに、けい酸Na系表面含浸工法や、連続繊維シート接着工法では、再劣化した旨の現場調査が報告されている。

表-6 凍害とASRの複合劣化に対する保全方法

No	区分	方法	A	B	C
1)	予防	材料と施工の両面で、防水性の高い部材を建設する。			レ
2)	事後	中塗材を厚くした表面被覆工法を適用する。	レ		
3)		ポリウレタン系弾性シーリング材注入工法後に、シラン系表面含浸工法と内部からのパイプ排水処理を行う。	レ		
4)		かぶりコンクリートの除去+補強鉄筋の追加と、コンクリート巻き立て工法を適用する。	レ		
5)		塩害とASRの中性化に対する対策と同様に、LiNO ₂ を含浸させる。			レ

参考文献

1) Deshenes, R.A., Giannini, E.R., Drimalas, T., Fournier, B. and Micah Hale, W.: Effects of Moisture, Temperature, and Freezing and Thawing on Alkali-Silica Reaction, ACI Materials Journal, Vol.115, No.4, pp.575-584, 2018