

積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の複合劣化要因に関する調査報告-橋梁詳細調査-

(株)北未来技研
北海道大学大学院
(財)北海道コンクリート技術センター

非会員 ○朝倉 啓仁
正会員 杉山 隆文
非会員 服部 健作

1. はじめに

積雪寒冷地では、一般環境よりも厳しい気象条件に配慮した形でコンクリートが施工され、耐久性のあるコンクリート構造物が利活用されているものの、現在では多くの構造物においてコンクリート自身の劣化や鋼材の腐食によって耐久性が低下し、補修あるいは補強が必要とされ始めている。一方、これまでのコンクリートの耐久性に関連する研究は、ほとんどが単一の劣化機構に起因する単独劣化を対象として進められてきた。しかしながら、単独の劣化機構のみでは対応できない実構造物の劣化事例が次第に明らかになってきており、複合劣化に対する関心が高まりつつある。そのため、多くの研究者および技術者は、単一の劣化現象のみならず複合して作用する劣化現象の原因についても解明して、今後の維持管理や新設構造物への更なる適用に繋げることが重要である。

このような背景の下、複合して作用する劣化要因を把握することを目的として、日本コンクリート工学協会北海道支部では「積雪寒冷地コンクリート複合劣化要因研究委員会」を設置し、積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の試験方法を整理するとともに、実構造物に応用した詳細調査事例の収集および分析を行った¹⁾。本稿では、詳細調査に着目した調査結果の概要の一部について報告する。

2. コンクリート構造物の調査・試験

橋梁点検等による外観上の特徴から劣化機構を推定することが困難である場合やコンクリート内部の状況を把握する必要がある場合、さらには劣化の範囲や程度を定量的に把握する必要がある場合などにおいて、コンクリート構造物の詳細調査および試験を実施する流れとなる。劣化機構（劣化要因）の推定、性能評価、対策要否の判定等の診断は、これら詳細調査および試験の結果を受けて実施される。**表-1**は、塩害、凍害および ASR の劣化機構に着目した劣化の原因・程度・予測に関する試験方法を一覧にして示している。

これより、紙面の都合上、調査および試験の概要については割愛するが、これらの試験は劣化が疑われる場合の原因の推定や特定、劣化のグレーディングに必要となる劣化程度の把握、さらには劣化の進行予測等に有効である。

表-1 劣化の原因・程度・予測に関する試験方法

調査・試験方法	規格等	関係する劣化機構			試験結果の利用		
		塩害	凍害	ASR	劣化原因	症状程度	進行予測
目視による方法	遠望・近接・打音含む	○	○	○	○	○	
	ひび割れ密度等計測	○	○	○		○	
強度試験	JIS A 1108 (圧縮強度)		○	○	○		
	JIS A 1149 (静弾性係数)		○	○	○		
塩化物イオンの試験	JIS A 1154	○			○	○	○
	JIS A 1171PCM の 7.8	○					
	JSCE-G573	○					
塩化物イオンの拡散係数の試験	JSCE-G571	○					
	JSCE-G572	○			○		
EPMA 面分析	JSCE-G574	○		○	○		
スケーリングによる欠損深さの測定	遠藤らの剥離度	○	○			○	
	熱画像の利用		○			○	
コンクリート組織の弛緩深さの測定	超音波伝播速度		○	○	○	○	
	微細ひび割れ観察		○	○	○	○	
	細孔径分布の利用		○	○	○		
	改良ポリアミド法		○	○	○	○	
残存膨張量試験	JCI-DD2			○	○	○	○
	カタメ法			○	○	○	○
	デシマック法	○		○	○	○	○
有害鉱物の判定	JCI-DD3			○	○		○
反応生成物の分析	走査型電子顕微鏡観察(SEM)			○			
	酢酸カルシウム蛍光法			○			
アルカリ量の分析	水溶性アルカリ量			○			
配合推定試験	コンクリート協会法 F-18		○	○	○		

3. 積雪寒冷地における詳細調査事例と複合劣化

別途投稿した橋梁点検に着目した調査報告²⁾では、複合劣化の多くは凍害劣化が関与していることを示した。そこで、本章では委員会内で整理した詳細調査事例の中から、凍害を含む塩害と中性化とASRの4つの劣化機構がそれぞれ複合的に作用していると推定された構造物の調査事例について紹介する。また、複数の詳細調査事例から劣化相互の相関関係を整理したため、その内容について概説する。

3.1 詳細調査事例の概要

ここで示した事例は、対象構造物が昭和 55 年に架設された道路橋の橋台である。本橋台に見られた変状は、ひび割れおよびスケーリングであり、一部に白色の滲出物が確認された。写真－1に、点検時に撮影した橋台豎壁のひび割れ状況を示す。橋台の変状に対して、劣化要因の把握および適切な処置を講じるために、架橋環境が海岸線に近いことや凍結防止剤の影響を考慮して、ASR、凍害および塩害を中心とした詳細調査を実施した。なお、コンクリート試験は、圧縮強度・静弾性係数試験、中性化深さ、塩化物イオン含有量試験、微細ひび割れ観察、ASR および凍害に関する試験等を行った。

試験の結果、圧縮強度は設計基準強度を満足していたものの、静弾性係数は全体的に低下傾向にあった。また、塩化物イオン試験では表面からの塩分浸透および中性化フロントの塩分濃縮が認められ、鋼材位置の塩分量が発錆限界値に達し鋼材腐食の懸念も認められた。一方、ASR に関する試験では、残存膨張量試験から膨張が今後生じる可能性は少ないと判断されたものの、粗骨材の安山岩中に有害鉱物（トリディマイト）が認められた。凍害に関する試験では、橋台コンクリートは耐凍害性に劣る可能性があると評価された。ここで、実施した試験のうち微細ひび割れ観察について概説する。本試験は、コアに蛍光染料を添加したエポキシ樹脂を低真空状態で注入して、硬化させた後、コア切断面に紫外線を照射して微細ひび割れを観察する手法である。

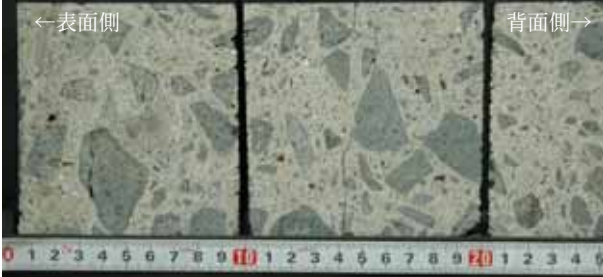
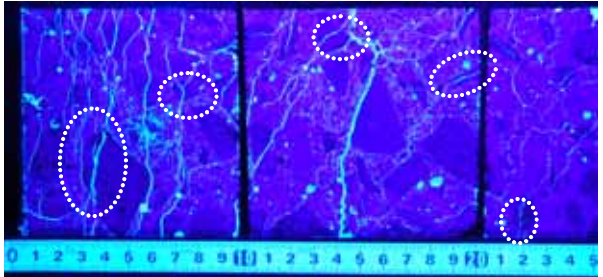
表－2に、微細ひび割れ観察の結果（表中○印は骨材の貫通ひび割れ）を示す。表より、ASR 特有の骨材の割裂やコア深部のひび割れ、さらに凍害劣化特有の表層部の層状ひび割れが認められた。詳細調査の結果、橋台に生じた変状の劣化機構としては、ASR と凍害が複合していると推定された。また、ひび割れに起因して中性化が進行するとともに、中性化と塩害の複合劣化も考えられた。

表－3には、本橋台のひび割れに対して想定される複合劣化の相関関係を示している。これより、飛来塩分や凍結防止剤の影響（アルカリ供給）が ASR を促進させることから塩害と ASR は相関関係にある、飛来塩分や凍結防止剤の影響（塩化物イオン浸透）が凍害を促進させることから塩害と凍害は相関関係にある、ひび割れに水分が侵入して ASR を促進させ、冬季ではその水分が凍結融解してひび割れが進行することから ASR と凍害は相関関係にある、中性化フロントに塩分が濃縮して鋼材腐食を促進させることから中性化と塩害は相関関係にある、以上のことが想定される。



写真－1 橋台豎壁のひび割れ状況

表－2 微細ひび割れの観察結果

コア縦断面の微細ひび割れ状況	
可視光	←表面側 背面側→ 
	

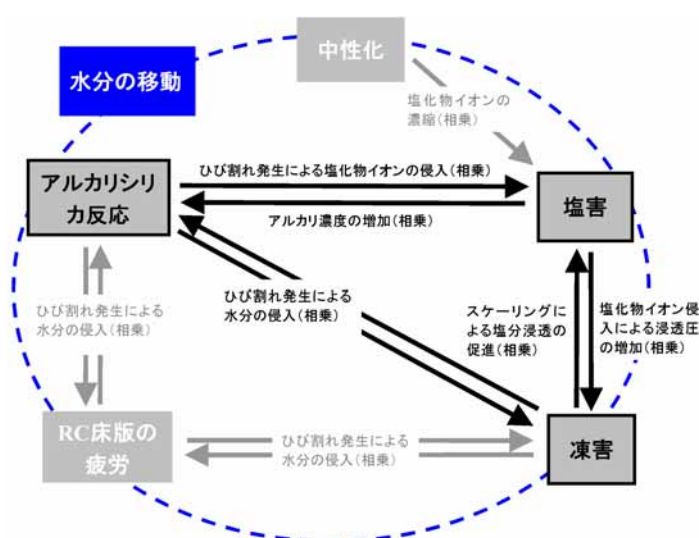
表－３ ひび割れに対する複合劣化（凍害，ASR，塩害，中性化）の相関関係

劣化機構	劣化要因・因子	劣化過程	劣化症状
塩害	飛来塩分 凍結防止剤の影響	塩化物イオンの浸透 不動態被膜の破壊 鋼材の腐食 ひび割れの発生 ↓アルカリ濃度増加 ↑ひび割れの発生	ひび割れの進行 錆汁 鋼材腐食の促進
ASR	反応性骨材 水分供給	反応生成物・吸水膨張 ひび割れの発生 水分の侵入 ↓↑ひび割れの発生 ↓↑水分の供給	ひび割れの進行 ASR 変状の進行
凍害	凍結融解作用 水分供給	凍結融解の繰返し作用 ひび割れの発生 スケーリングの発生 水分の侵入 ↓塩化物イオンの濃縮 ↓スケーリング かぶり減少 ↑スケーリング 促進(浸透圧)	ひび割れの進行 スケーリングの進行
塩害	飛来塩分 凍結防止剤の影響	塩化物イオンの浸透 不動態被膜の破壊 鋼材の腐食 ひび割れの発生 ↑塩化物イオンの濃縮	ひび割れの進行 錆汁 鋼材腐食の促進
中性化	二酸化炭素	乾燥状態 炭酸ガスの侵入 水分・酸素の侵入 鋼材の腐食 ひび割れの発生	ひび割れの進行 錆汁 鋼材腐食の促進

3.2 調査事例から推定された劣化相互の複合関係

複数の調査事例の中から，2 つの劣化機構相互の関係にあった事例数は全 15 事例であり，このうち凍害・ASR・塩害に着目した相互関係では 12 事例と 8 割を占めていることが明らかとなった。これは，劣化が疑われる変状において，凍害・ASR・塩害の劣化要因が様々な形で関与して，複合劣化が生じている可能性が高いことを示すものである。図－1 には，凍害・ASR・塩害の相関関係を示している。

図より，塩害の劣化要因である飛来塩分および凍結防止剤の影響は，アルカリ濃度の増加により ASR を促進させ，塩化物イオン侵入による浸透圧の増加で凍害を促進させる。また，凍害の劣化要因である凍結融解作用は，ひび割れ発生による水分の侵入で ASR を促進させ，スケーリングによる塩分浸透で塩害を促進させる。さらに，ASR の劣化要因である反応性骨材は，ひび割れ発生による塩化物イオンの侵入で塩害を促進させ，ひび割れ発生による水分の侵入で凍害を促進させる。このようなことから，凍害・ASR・塩害の相関関係については「積雪寒冷地における複合劣化のトライアングル」と呼称することとした。



図－1 積雪寒冷地における複合劣化のトライアングル（凍害・ASR・塩害の相関関係）

4. 複合する劣化機構を推定する上での課題と将来展望

4.1 今後の課題

北海道では、「積雪寒冷地における複合劣化のトライアングル」、すなわち凍害・ASR・塩害相互の複合関係があり、外観上から劣化機構相互の関係を把握することは困難である。したがって、複合する劣化機構を推定する上で、1)凍害とASRとのひび割れが酷似するなど劣化機構を原因とする症状の見極め、2)凍害さらには凍害との複合劣化の程度を計る劣化指標の規定、これらが今後の課題となる。

4.2 将来展望

詳細調査事例を整理した結果、詳細調査から単独劣化を特定できる劣化機構は、中性化（鋼材腐食の可能性）、塩害（鋼材腐食の可能性）、ASR（残存膨張の可能性）の3つであり、凍害については主にひび割れやスケーリング等の外観上の特徴から劣化要因を推定していることが現状であった。一部では、凍害に関する試験を実施する手法があるものの、これらは凍害を受けやすいコンクリートか否かの材料試験であり、劣化判定を間接的に評価しているだけである。したがって、表－4に示す劣化機構と劣化指標の関係より、凍害劣化に関してはダメージの特定方法、凍害深さの測定方法、凍害劣化の診断方法など、直接的に評価する手法の確立が望まれている。また、凍害の劣化指標に関する技術開発が進めば、複合劣化のトライアングルについてもさらに研究が進むものと考えられる。

表－4 劣化機構と劣化指標の関係

劣化機構		劣化指標の例	試験方法
単独劣化	中性化	・中性化深さ ・鋼材腐食量 ・腐食ひび割れ	・中性化深さ試験（フェノールフタレイン噴霧法等）
	塩害	・塩化物イオン濃度 ・鋼材腐食量 ・腐食ひび割れ	・塩化物イオン濃度試験 （電位差滴定法等）
	凍害	・凍害深さ（研究開発中） ・鋼材腐食量	・技術開発が望まれる分野
	ASR	・膨張量 ・ひび割れ密度	・残存膨張量試験
複合劣化	塩害＋中性化	・中性化深さ	・中性化深さ試験（フェノールフタレイン噴霧法等）
	凍害＋ASR 凍害＋塩害 ASR＋塩害	・劣化深さ等 （研究開発中）	・技術開発が望まれる分野

5. おわりに

本委員会では、積雪寒冷地における劣化機構の特徴を把握するために、コンクリート構造物の試験方法を整理するとともに、実構造物に応用した詳細調査事例の収集および分析を行った。その結果、北海道においては、凍害・ASR・塩害が相互に複合している関係（積雪寒冷地における複合劣化のトライアングル）にあり、詳細調査事例では8割と高い比率で生じていることを示した。さらには、凍害およびASRによる劣化は外観からの評価では難しいこと、詳細調査および試験を実施しても凍害劣化や複合劣化を特定することが難しいことなど、劣化機構を推定する際の難しい現状と課題について明らかにした。今後は、劣化指標の規定や劣化症状の測定技術など、研究開発していくことが重要と考える。

参考文献：

- 1) 日本コンクリート工学協会，北海道支部：積雪寒冷地コンクリート複合劣化要因研究委員会，報告書，2010.3
- 2) 花田眞吉，杉山隆文，馬場道隆：積雪寒冷地におけるコンクリート構造物の複合劣化要因に関する調査報告-橋梁点検-，第20回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム，2011.