

ASRと凍害の複合劣化に及ぼす環境の影響に関する基礎的研究

国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム ○遠藤 裕丈
国立研究開発法人土木研究所 寒地土木研究所 耐寒材料チーム 島多 昭典

寒冷地の鉄筋コンクリート構造物は凍害の発生が懸念されるが、反応性骨材が含まれている場合はアルカリシリカ反応（ASR）と凍害の複合劣化も懸念される。本研究ではASRと凍害の複合劣化に対する維持管理方法の確立に向けた検討の一環として、ASRと凍害の複合劣化に及ぼす温度や水分供給の有無など環境の影響を評価するための基礎実験を行った。その結果、鉄筋コンクリートの長さ変化に及ぼすASRと凍害の複合劣化の影響は、特にASRの影響が大きいこと、ASRは高温下で進行しやすいことがわかった。また、シラン系表面含浸材による対策の効果を検討し、吸水防止層が残存している場合、高温下でも劣化抑制が期待できる知見を得た。

キーワード：コンクリート、アルカリシリカ反応（ASR）、凍害、シラン系表面含浸材

1. はじめに

寒冷地の鉄筋コンクリート構造物は、凍結融解および凍結防止剤の作用を受ける厳しい環境に曝されている。また、中にはコンクリートに反応性骨材が含まれていることもある。このような構造物においては、アルカリシリカ反応（以下、ASRと記す）と凍害の複合劣化が懸念される。

ASRは、反応性骨材に含まれるシリカ鉱物（ SiO_2 ）とコンクリート中のアルカリ金属の水酸化物（ NaOH ）との反応によって骨材周囲に形成されるアルカリシリカゲル（ $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ ）の吸水膨張による劣化現象であり、1982年に阪神地区で発見されて以降、各地で被害が報告されている。近年は北海道においても、写真-1に示すようにASRと凍害の複合劣化の事例が確認されている。



写真-1 ASRと凍害の複合劣化と診断された橋台の例

ASRの補修に関しては、現在、水処理や美観回復を兼ねた断面修復が行われている状況にあるが、ASRと凍害の複合劣化に関しては、凍害に及ぼすASRの影響、もしくは、ASRに及ぼす凍害の影響など劣化挙動の特徴や、劣化抑制対策の効果について不明な点が多い。

そこで、ASRと凍害の複合劣化に対する維持管理方法の確立に向けた検討の一環として、ASRと凍害の複合劣化に及ぼす温度や水分供給の有無など環境の影響を評価するための基礎実験を行った。また、劣化対策の評価に関して、ここでは、ASRによって生成されるアルカリシリカゲルの吸水膨張の抑制を目的とした使用の実績が全国的に多く、北海道開発局でも凍害・塩害対策として凍結防止剤散布路線を中心に適用されている²⁾シラン系表面含浸材に着目し、劣化の抑制効果について検討した。

2. 実験概要

(1) コンクリート配合、材料

表-1にコンクリートの配合を示す。水セメント比は55%に設定した。セメントは普通ポルトランドセメントとした。コンクリートに塩化ナトリウム（ NaCl ）が供給されると、 NaCl がコンクリート細孔溶液内で Na^+ と Cl^- に分離し、 Cl^- はフリーデル氏塩としてセメント硬化体に固定化する一方、 Na^+ は固定化されないことから、電気的に中性となるために固定化された Cl^- に見合うだけの量の陰イオンが必要となり、セメント硬化体に豊富に存在する水酸基イオン（ OH^- ）が細孔溶液内に溶出し、コンクリートのアルカリ濃度が高まることが既報^{3), 4)}で

表-1 コンクリート配合

配合 記号	水セメ ント比	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	NaCl
G0	55%	155	282	851	1048 (G0)	15.0
G1	55%	155	282	851	1056 (G1)	15.0
G2	55%	155	282	851	1052 (G2)	15.0

- ・セメント：普通ポルトランドセメント
- ・スランプの目標値：12±2.5cm
- ・空気量の目標値：4.5±1.5%

表-2 実験で用いた粗骨材のモルタルバー試験の結果

骨材名	26週膨張率	判定
G0 (小樽産非反応性砕石)	0.012%	無害
G1 (北海道産安山岩砕石1)	0.590%	無害でない
G2 (北海道産安山岩採石2)	0.481%	無害でない

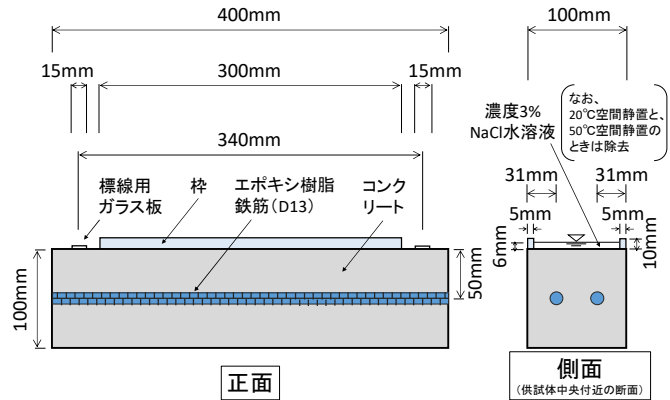


図-1 供試体

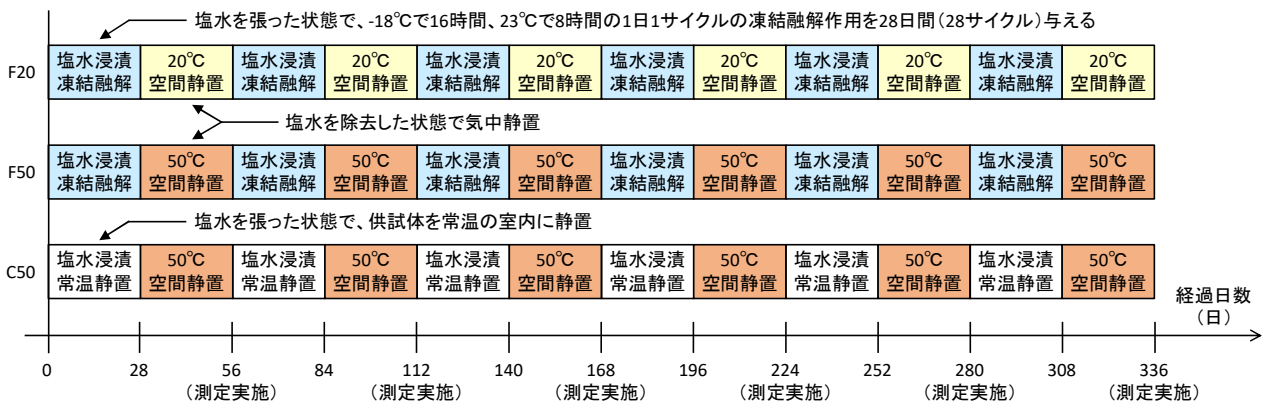


図-2 実験環境

述べられている。そこで、コンクリートのアルカリ濃度を高めてASRを促進させる理由から練混ぜ時にNaClを混入した。混入するNaClの量は、上田ら⁹⁾の研究ならびに事前の予備実験を参考に15kg/m³に設定した。スランプは12±2.5cm、空気量は4.5±1.5%を目標とし、AE減水剤（リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体）とAE助剤（変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤）で調整した。配合記号は後述する使用骨材名としている。

細骨材は苫小牧産の非反応性海砂（表乾密度2.66g/cm³、吸水率1.41%、除塩処理済）を使用した。粗骨材は、比較対象の非反応性骨材として、小樽産の砕石G0（表乾密度2.68g/cm³、吸水率1.48%、最大径20mm）を使用した。一方、反応性骨材は、骨材の産地や種類によってASRの反応性や膨張速度が異なる⁹⁾ことに鑑み、極力、普遍的な傾向を掴むため、北海道産の安山岩砕石G1（表乾密度2.70g/cm³、吸水率1.72%、最大径20mm）と、産地の異なる北海道産の安山岩砕石G2（表乾密度2.69g/cm³、吸水率1.79%、最大径20mm）の2種類を使用した。表-2は、実験で使用する粗骨材G0、G1、G2のASR特性を把握するためにJIS A 1146に準じて行ったモルタルバー試験の結果を示している。G0は、材齢26週における膨張率が0.1%未満となり、判定は「無害」であった。一方、G1、G2については、いずれの骨材も材齢26週の膨張率が

0.1%以上となり、判定は「無害でない」であった。

(2) 供試体

図-1に供試体を示す。供試体の寸法は100mm×100mm×400mmとし、打設面から深さ50mm位置にD13鉄筋を2本配した。ここでは実験結果に及ぼす鋼材腐食の影響を排除するため、エポキシ樹脂鉄筋を使用した。打設後、7日間保湿養生を行い、その後は材齢28日まで温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室に静置した。

この間、材齢21日において、打設面以外の5面をエポキシ樹脂でコーティングするとともに、打設面に試験水を張るための発泡スチロール製の土手および長さ変化測定用の標線用ガラスを貼り付けた。また、シラン系表面含浸材によるASRと凍害の複合劣化抑制効果を検討するため、一部の供試体において、北海道開発局道路設計要領第3集第2編参考資料B²⁾に記載されている選定目安を満たすシラン系表面含浸材を350g/m²塗布した。コンクリート表層へのシラン系表面含浸材の含浸によって、打設面付近には厚さ5～10mmの吸水防止層が形成された。

(3) 実験環境

材齢28日より図-2に示す実験環境に供試体を336日間曝した。ここでは、試験水として濃度3%NaCl水溶液（以下、塩水と記す）を打設面に厚さ6mm張り、ASTM C 672に準じた-18℃で16時間、23℃で8時間の1日1サイク

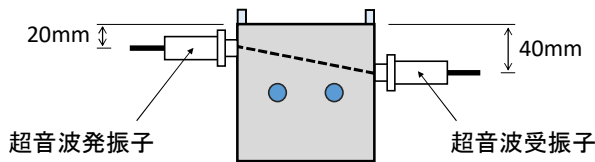


図-3 深さ20～40mmの超音波測定での発・受振子のあて方

ルの凍結融解環境に28日間、塩水を除去して20℃もしくは50℃の空間に28日間、と交互に曝した。比較のため、塩水を張った状態で凍結融解を常温静置に置き換えたケースも設けた。環境記号は、凍結融解の有無（有：F、無：C）と空間静置時の温度を組み合わせた形とした。

(4) 測定

ここでは、環境を20℃もしくは50℃の空間静置から切り替える際に、JIS A 1129-1に準じたコンパレータ法による長さ変化、深さ20～40mmのかぶりコンクリートの超音波伝播速度およびスケリング量の測定を行った。

超音波伝播速度の測定は、角間らの研究⁷⁾を参考に、図-3に示すように、測定結果に及ぼすひび割れの向きの影響を排除するため、ひび割れ検出精度を高めるねらいで、超音波の伝播経路とひび割れが良く交差するように、超音波の発・受振子の位置を深さ方向にずらして測定した。ここでは、周波数28kHzの超音波測定器を使用した。そして、緒方らが提案した式(1)⁸⁾、(2)より、超音波伝播速度から深さ20～40mmの相対動弾性係数を求めた。

$$E_{dn} = 4.0387V_n^2 - 14.438V_n + 20.708 \quad (1)$$

$$RE_d = \frac{E_{dn}}{E_{d0}} \times 100 \quad (2)$$

ここに、 E_{dn} は n 日経過後の動弾性係数(GPa)、 V_n は n 日経過後の超音波伝播速度(km/s)、 RE_d は n 日経過後の相対動弾性係数(%)、 E_{d0} は試験開始前の動弾性係数(GPa)である。

スケリング量は、剥離したコンクリート片を採取し、110℃で24時間乾燥させた後の質量を測定値とした。

3. ASRと凍害の複合劣化に及ぼす環境の影響に関する実験結果、考察

(1) 長さ変化および相対動弾性係数

図-4に長さ変化に及ぼす使用骨材および環境の影響、図-5に深さ20～40mmの相対動弾性係数に及ぼす使用骨材および環境の影響について示す。凡例は「使用骨材—実験環境」の組み合わせで表示している。

無害の骨材G0を使用した場合、長さ変化は若干ではあるが凍結融解を与えたF20とF50の方がC50より大きく、凍害の影響が示された。F20、F50は凍結融解28日間おきに20℃および50℃の空間に28日間曝しているが、長さ変

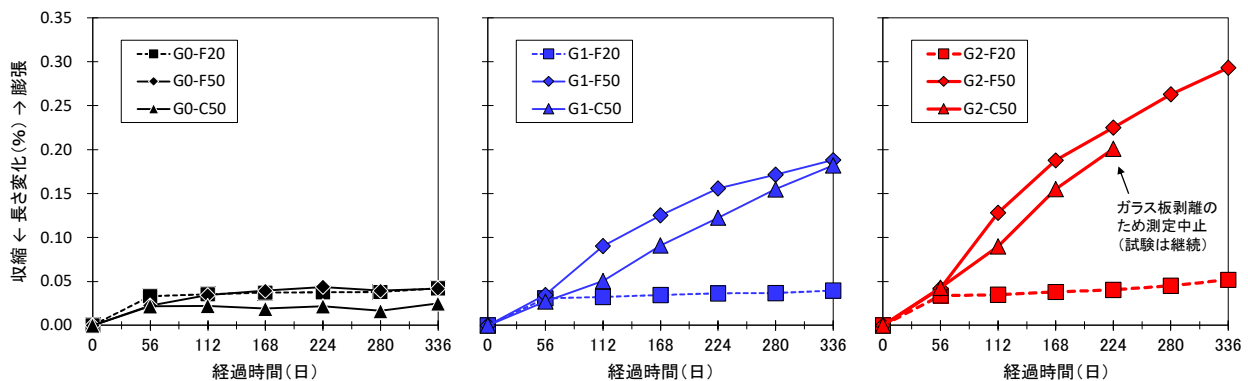


図-4 長さ変化に及ぼす使用骨材および環境の影響

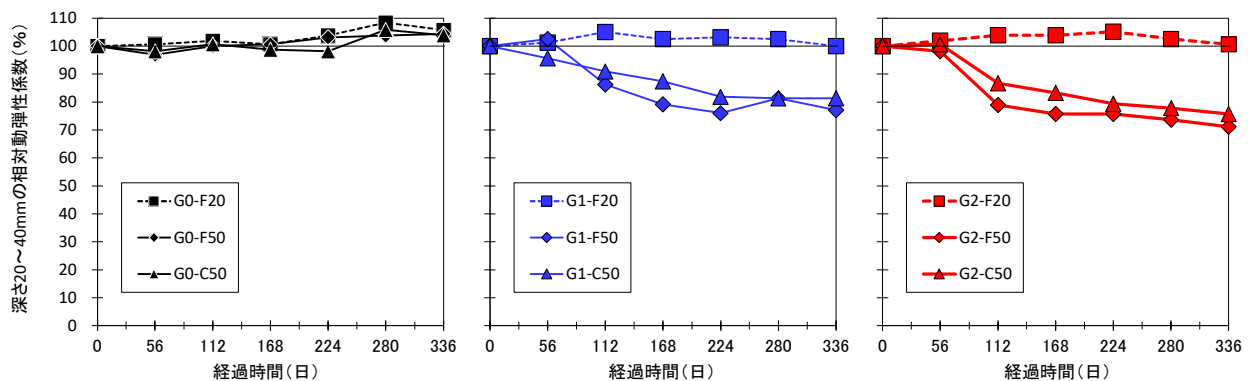


図-5 深さ20～40mmの相対動弾性係数に及ぼす使用骨材および環境の影響

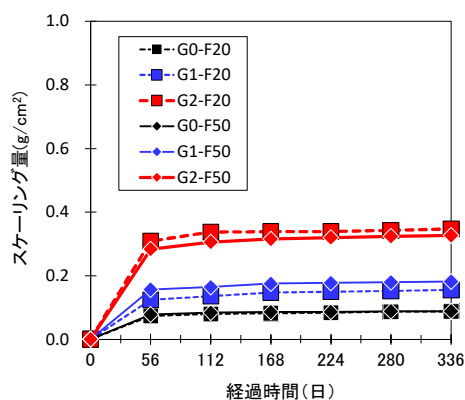


図-6 スケーリング量の測定結果（環境条件F20とF50）



写真-2 G1-F50の336日目目の表面状況

化に及ぼす空間温度の影響は見受けられなかった。相対動弾性係数はいずれのケースもほぼ100%で推移した。

反応性骨材G1を使用した場合、凍結融解28日間おきに20°C空間に28日間曝したF20は、長さ変化は56日目以降横ばいで推移し、336日目目の長さ変化は0.05%以下、相対動弾性係数はほぼ100%であった。これは前述のG0と同程度である。これに対して、凍結融解28日間もしくは常温下での塩水浸漬28日間おきに50°C空間に28日間静置したF50とC50は、共に長さ変化が大きく、ASRに及ぼす高温の影響が明確に示された。F50とC50を比較すると、表面で測定した長さ変化は若干ではあるがF50が大きく、一方で、深さ20～40mmの相対動弾性係数は双方ほぼ同程度で推移した。凍結融解を受けないC50の相対動弾性係数の低下要因が基本的にASRのみと考えられることから、F50で発生した複合劣化の原因はASRが殆どを占め、塩水と冷気に直接触れる表面付近を中心に、ASRによって生じたひび割れに侵入した塩水の凍結膨張による凍害の影響も加わったと考えられる。反応性骨材G2を使用した場合についても、同様の結果であった。

(2) スケーリング

図-6にF20、F50におけるスケーリング量の測定結果を示す。F20、F50のいずれにおいても、試験開始後、56日目にかけて、G1とG2の方がG0よりも多くスケーリングが発生しており、使用骨材の影響が示された。表面は、ASR発生3条件（骨材、水、アルカリ）が最も揃いや

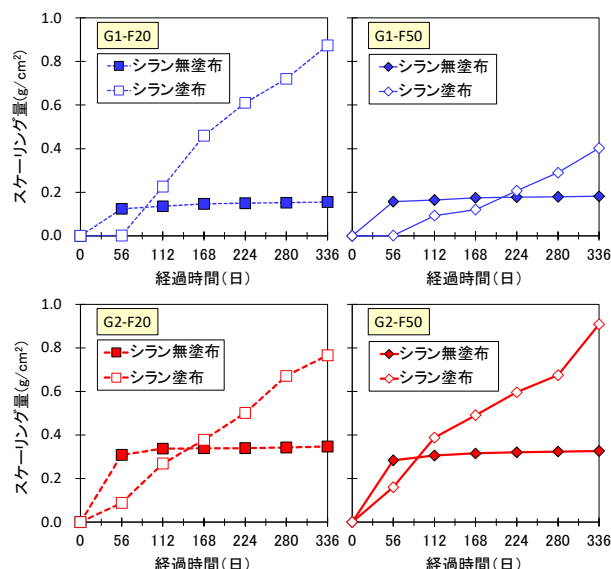


図-7 スケーリングに及ぼすシリラン系表面含浸材の影響（反応性骨材G1とG2、実験環境F20とF50）

すく、かつ、塩水と直に接するためアルカリ濃度が一層高まりやすい。このことからF50に加えて、長さ変化が小さかったF20（図-4）でも供試体の表面近傍において集中的にASRが早期に発生し、その影響によって表面ペースト広範に微細ひび割れが多く発生したことで、試験開始直後のスケーリング増加に繋がった可能性がある。一方、56日目以降は、スケーリングの進行がいずれのケースも緩やかで、スケーリングの進行に及ぼす使用骨材の影響は見受けられなかった。写真-2は反応性骨材G1のF50における336日目目の表面状況を示している。スケーリングは表面全体に見られ、ASRによる巨視的なひび割れは表面の一部で見られる。56日目以降のF50の劣化形態は、スケーリングの進行は緩やかな一方、長さ変化は大きいことが特徴的である（図-4）。このことから56日目以降は、主にASRによって生じた巨視的なひび割れ箇所で複合劣化が進展すると考えられる。

4 シラン系表面含浸材によるASRと凍害の複合劣化抑制効果の評価に関する実験結果、考察

図-7はG1およびG2を対象に、材齢21日にシリラン系表面含浸材を塗布し、F20およびF50の環境に曝したときのスケーリング量の測定結果を示している。シリラン系表面含浸材を塗布した場合、塩水浸漬下で凍結融解を与えると、試験開始直後からしばらくの間、無塗布よりもスケーリングが少ない状態で推移した。しかし、その後も塩水浸漬下で凍結融解を与え続けたところ、試験の途中でスケーリングが増加に転じる結果が示された。

図-8および図-9はG1におけるF20、F50および凍結融解を与えていないC50の長さ変化および深さ20～40mmの相対動弾性係数の測定結果である。3章の実験で顕著な膨

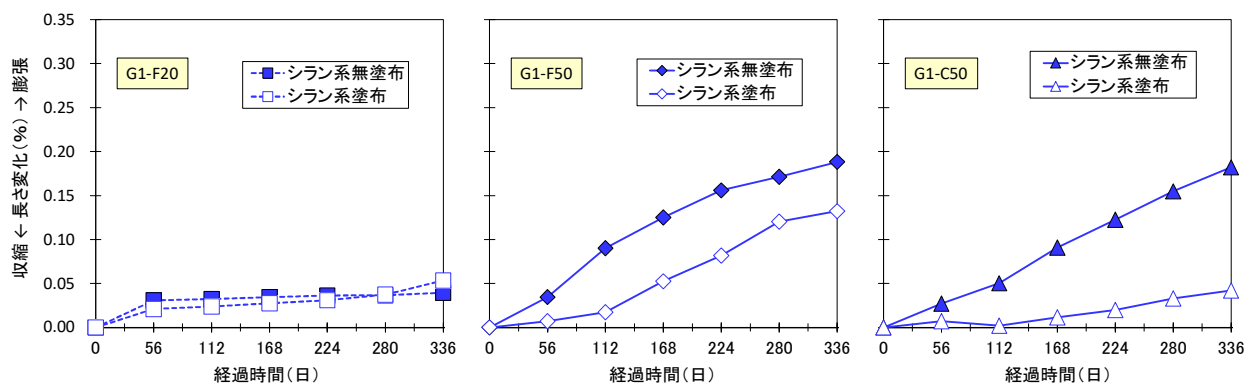


図-8 長さ変化に及ぼすシラン系表面含浸材の影響（反応性骨材G1の場合）

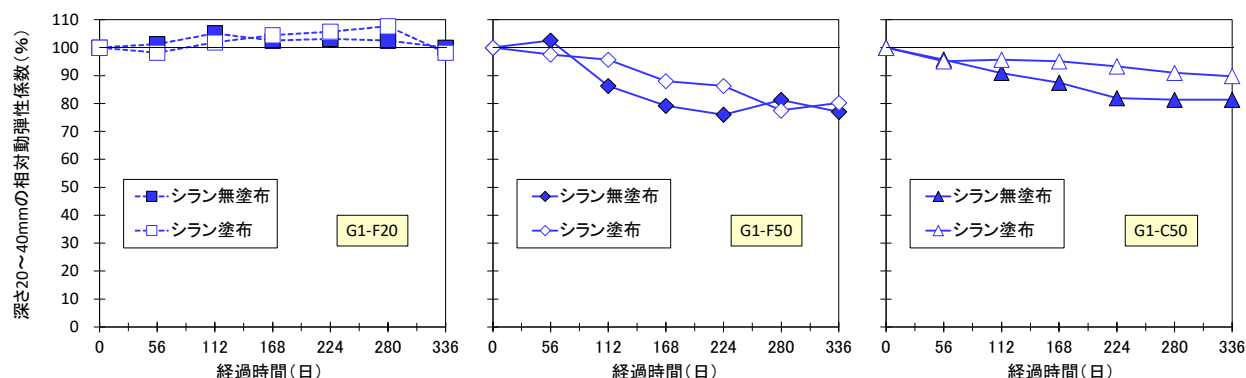


図-9 深さ20～40mmの相対動弾性係数に及ぼすシラン系表面含浸材の影響（反応性骨材G1の場合）

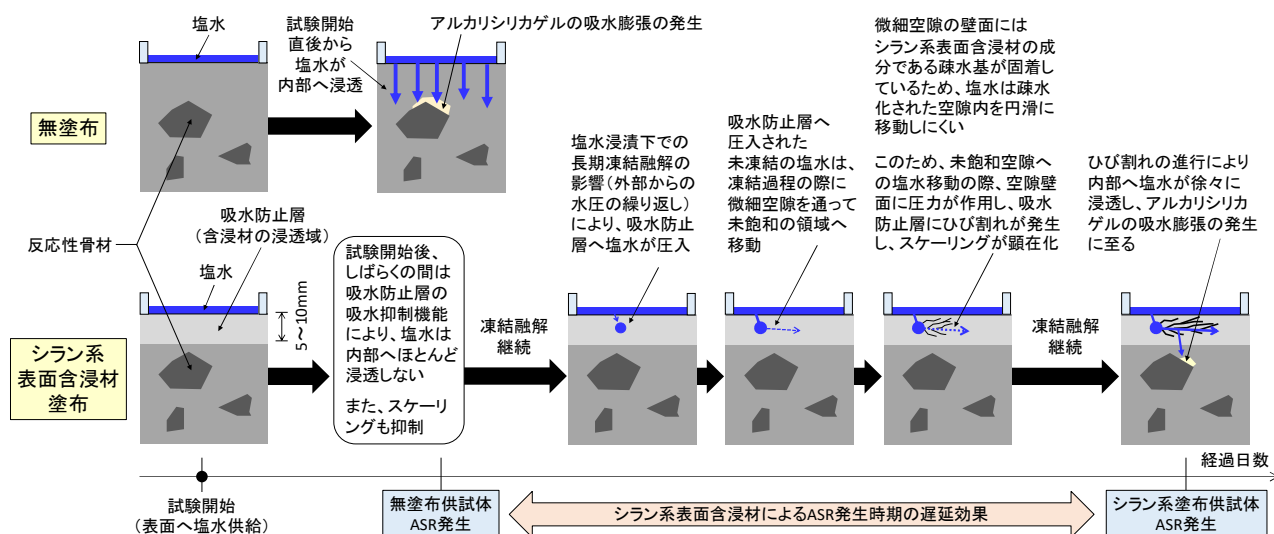


図-10 実験環境F50における反応性骨材を用いたコンクリートの劣化挙動の考察

張を示したF50とC50に着目すると、シラン系表面含浸材を塗布した方が、長さ変化の増加および相対動弾性係数の低下が抑制されている傾向にあった。

図-10は、図-7～9の結果から、G1のF50におけるASRと凍害の複合劣化の挙動を考察したものである。シラン系表面含浸材を塗布した場合、吸水防止層による塩水の侵入抑制効果により、試験開始後しばらくの間、スケーリングとASRが共に抑制される。その後、凍結融解の長期繰り返しの影響で、吸水防止層内に塩水が圧入される。凍結過程の際、未凍結の塩水は水圧緩和のために未飽和

の領域へ移動しようとするが、吸水防止層内の空隙壁面にはシラン系表面含浸材の主成分である疎水基が固着しており、これによって空隙内での塩水の流動が阻害され、空隙壁面に大きな水圧が作用してひび割れが発生し⁹⁾、スケーリングが顕在化する。次いで、塩水の内部侵入が始まり、ASRの発生に至る。なお、図-8で示したように、無塗布の場合は、試験開始直後から塩水が内部に侵入するため、膨張と内部劣化が早期に発生している。よって、シラン系表面含浸材の塗布は、ASRと凍害の複合劣化による膨張発生を遅らせる効果は期待できると考えられる。

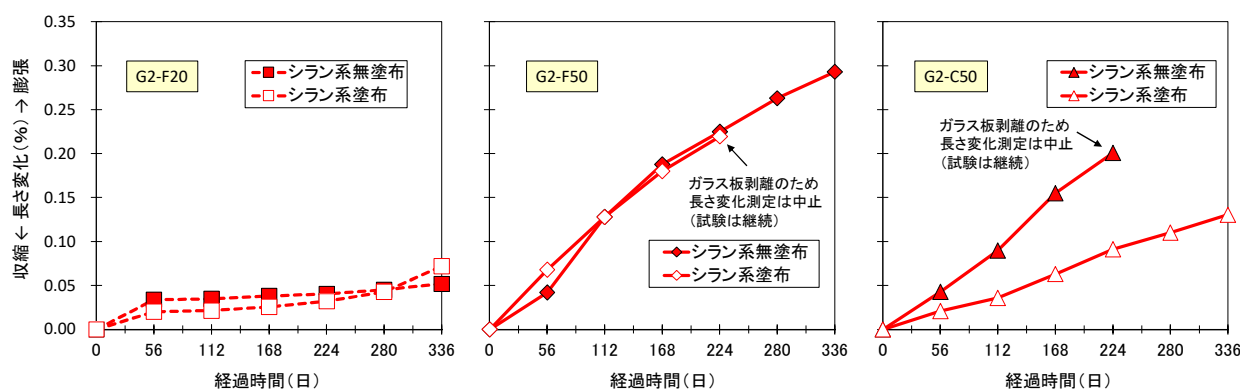


図-11 長さ変化に及ぼすシリラン系表面含浸材の影響（反応性骨材G2の場合）

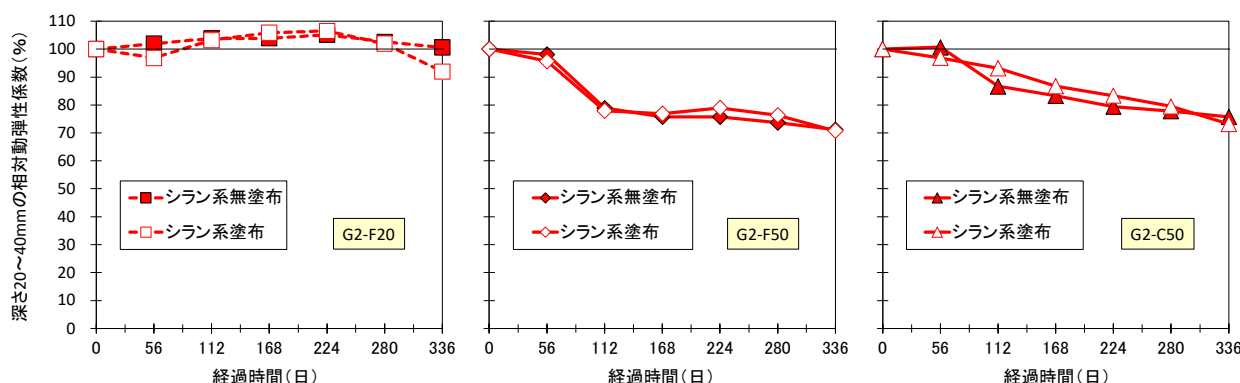


図-12 深さ20～40mmの相対動弾性係数に及ぼすシリラン系表面含浸材の影響（反応性骨材G2の場合）

図-11および図-12は、G2を用いた場合の長さ変化と深さ20～40mmの相対動弾性係数の測定結果である。G2のF50では、シリラン系表面含浸材を塗布したものの早期に膨張する結果が示された。図-7をみると、シリラン系表面含浸材を塗布したG20のF50は、早期にスケリングが発生している。よって、吸水防止層にひび割れが早期に発生したことが要因と思われる。

シリラン系表面含浸材によるASRと凍害の複合劣化抑制対策は、主に、部材壁面など水が滞留しにくく、吸水防止層の機能が持続しやすい部位で有効と考えられる。

5. まとめ

本研究ではASRと凍害の複合劣化に及ぼす環境の影響とシリラン系表面含浸材による劣化抑制効果の評価に関する基礎検討を行った。得られた知見は下記の通りである。

- (1) ASRに及ぼす高温の影響は大きい。また、ASRと凍害の複合劣化による長さ変化は、ASRの単独作用による場合よりも大きくなる。
- (2) シリラン系表面含浸材によって形成される吸水防止層はASRの発生を遅らせる効果が全体的に期待される。

北海道では近年、年平均気温が高まっており¹⁰⁾、夏期の高温によるASRが懸念される。今後は経年部材を対象

とした効果的なASR膨張抑制対策に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 中井俊英, 大橋猛: 北海道における ASR 反応性骨材の実態について, 昭和 62 年度北海道開発局技術研究発表会, pp.77-82, 1988.2
- 2) 令和 3 年度北海道開発局道路設計要領, 第 3 集橋梁, 第 2 編コンクリート, 参考資料 B「道路橋での表面含浸材の適用にあたっての留意事項」, 2021.4
- 3) 宇野祐一, 小林一輔: 塩化ナトリウムの混入がモルタルの諸性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.465-470, 1990.6
- 4) 二村誠二, 福島正人: 塩素イオンがアルカリシリカ反応に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.789-794, 1990.6
- 5) 上田隆雄, 園田胡桃, 中山一秀, 塚越雅幸: ASR と凍害の複合劣化コンクリートに対する表面保護工法の適用, 第 17 回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, pp.497-502, 2017.10
- 6) ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書, 公益社団法人日本コンクリート工学会, 2014.7
- 7) 角間恒, 西弘明: 超音波法を用いた床版の劣化調査について, 平成 30 年度北海道開発局技術研究発表会, 2019.2
- 8) 緒方英彦, 服部九二雄, 高田龍一, 野中賢博: 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, 2002.6
- 9) 遠藤裕丈, 田口史雄, 宮本修司, 村中智幸, 後藤浩之, 林大介, 坂田昇, 名和豊春: シリラン系表面含浸材による寒地コンクリート構造物の耐久性向上効果, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.1, pp.69-88, 2011.2
- 10) 札幌管区気象台: 北海道の年平均気温のうつりかわり (<https://www.jma-net.go.jp/sapporo/bosai/bosaiyoku/kikou/k08.html>)