

# 温度や湿度の変動がアルカリシリカ反応の進行に及ぼす影響に関する基礎的検討

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 ○白井 良明  
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 吉田 行

積雪寒冷地において、これまで報告が少なかったアルカリシリカ反応（以下、ASR）によるコンクリート構造物の劣化が近年増加している。ASRは骨材周囲に形成されたゲルが膨潤することによってひび割れに至る劣化現象である。温度や湿度等の環境作用もASRの進行に影響を及ぼすことが指摘されているが、未解明な点も多い。本研究では、温度や湿度の異なる促進環境を準備し、ASRの進行に及ぼす温度や湿度の変動の影響について検討を行った。

キーワード：アルカリシリカ反応、温度、湿度

## 1. はじめに

アルカリシリカ反応（以下、ASR と記す）は、橋梁における疲労や塩害と並ぶ三大損傷のひとつに位置付けられており、耐久性に深刻な影響を及ぼすことが知られている。

ASR は、骨材に含まれる反応性シリカ鉱物（ $\text{SiO}_2$ ）と、コンクリート中に存在する、あるいは外部から供給されるアルカリイオン（ $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ ）との反応により、骨材周囲に吸水膨張性を有するアルカリシリカゲル（以下、ゲル）が生成され、構造物内部に既に存在する水分や外部から浸入する水分の影響でゲルが膨張し、コンクリートに巨視的なひび割れを生じさせる劣化現象である。

ASR は、1940 年代にアメリカにおいて初めて報告された現象である。日本国内においては、1982 年に阪神地区で ASR によるコンクリートの劣化が初めて確認され、その後、全国各地で被害事例が報告されている。近年では、写真-1 に示すように、寒冷地域である北海道においても、ASR による被害が報告されている。

新設構造物における ASR 抑制対策は、1989 年に旧建設省から通達された「アルカリ骨材反応抑制対策について」に基づき、(1) コンクリート中のアルカリ総量を  $3 \text{ kg/m}^3$  以下に規制すること、(2) 抑制効果のある混合セメントを使用すること、(3) 無害な骨材を使用すること、のいずれかの方法を選択することが求められている。しかし、通達発令以前に無対策で施工された既設コンクリート構造物も多く存在しており、今後、ASR による被害事例の増加が懸念される。

ASR は、反応性を有する骨材、水分、アルカリイオン（ $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ ）の3条件が揃って初めて生じる化学反応である。これら3条件に加えて、温度や湿度などの環境条件



写真-1 橋台のASR劣化状況の一例（北海道）

の影響に関しても種々の知見があり、例えば、高温となる部位では、ASRによるひび割れの発生が顕著であることが報告されている<sup>1)</sup>。また、擁壁に関しては、直射日光を受ける前面側でASRによるひび割れが多く確認された一方、土中部（背面）ではASRによるひび割れがほとんど認められなかったと報告されている<sup>1)</sup>。さらに、湿度の影響に関して、同一の温度環境下でも、水分の供給程度によってASRによる膨張傾向に顕著な差異があること<sup>2)</sup>、加えて、高湿度で十分な水分が供給される環境下では、温度条件の違いにかかわらず、水中環境と同様のASRによる膨張傾向を示すことが報告されている<sup>2)</sup>。

このように、ASRの進行には、温度や湿度をはじめとする各種環境条件が相互に複雑に作用して影響を及ぼすことが指摘されている。しかしながら、これら環境要因の影響の重みについては、現時点で十分に解明されていない。

そこで、著者らは温度および湿度に着目し、温度および湿度の異なる促進環境を設定し、温度や湿度がASRの進行に及ぼす影響を検証する実験を行っている。本報告では温度や湿度の変動がASRの進行に及ぼす影響を検討した結果について述べる。

## 2. 北海道の自然環境下でのコンクリート温度および湿度の実態把握

はじめに、温度や湿度がASRの進行に及ぼす影響を検討する実験に先立ち、北海道の自然環境下でのコンクリートの温度および湿度の実態を把握するため、北海道陸別町小利別の寒地土木研究所小利別暴露試験場にコンクリートを暴露し、温度と湿度を調べる暴露試験を行った。

### (1) 暴露実験概要

#### a) 温湿度計、温度計埋設供試体の作製

図-1に、温度と湿度を測定するために作製した供試体を示す。寸法は20cm×20cm×40cmとした。温湿度計は、写真-2に示すように、鉄筋(D10)を斜めに配し、コンクリート表面(以下、表面と記す)、表面から深さ1、3、5cm位置の鉄筋に温湿度計を固定させる方法でコンクリート内部へ設置した(写真-2)。

表-1にコンクリートの配合を示す。水セメント比(W/C)は55%とし、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は苫小牧産の海砂(表乾密度2.71g/cm<sup>3</sup>、吸水率0.77%、除塩処理済)、粗骨材は小樽産(表乾密度2.78g/cm<sup>3</sup>、吸水率1.71%、最大寸法20mm)を使用した。打設後、打設面を湿布養生し、翌日脱型を行い6日間、20℃環境で湿布養生を行った。その後、設置までの10日間、温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室に保管し、小利別暴露試験場へ運搬した。

#### b) 温度、湿度の計測方法

供試体を2025年6月25日から2025年9月28日までの約3ヶ月間、小利別暴露試験場に設置し、日向、日陰の環境下で温度、湿度の計測を1時間間隔で行った。

また、日向に関しては、表面全体に太陽光(日射)が当たるよう、札幌市の7月から9月の南中高度の平均<sup>4)</sup>を参考に、日向の供試体架台を40度傾けた(写真-3)。

### (2) 暴露実験結果・考察

図-2に温度、湿度の計測結果を示す。ここでは、表面と内部における温度、湿度の大凡の差を比較するため、代表して、外気温、表面および深さ5cmにおける測定データについて示す。

はじめに、温度分布に着目すると、日向においては表面と深さ5cmの温度差は概ね5℃程度であり、特に表面温度が高い時間帯に温度差が確認された。一方、日陰では対照的に、表面と深さ5cmの温度差が小さかった。日向における表面温度は、7月に最大で約50℃までに達し、日陰においても、40℃近くまで上昇した。今回の測定により、寒冷地域である北海道においても、コンクリート表面近傍の温度は40～50℃まで上昇する可能性があることが明らかとなった。また、表面と外気温を比較すると日向では外気温が高い時間に表面温度が10℃程度高かったのに対し、日陰では表面より外気温の方が5℃程度高かった。

一方、湿度に関しては、日向の表面では7月に最大

60%まで低下しており、乾湿のサイクルが生じていた。これに対し、日陰の表面は概ね85%前後で推移しており、全期間を通じて概ね湿潤状態にあった。深さ5cmについては、日向、日陰のいずれにおいても100%のままで変動は認められず、湿潤状態が保持されていた。

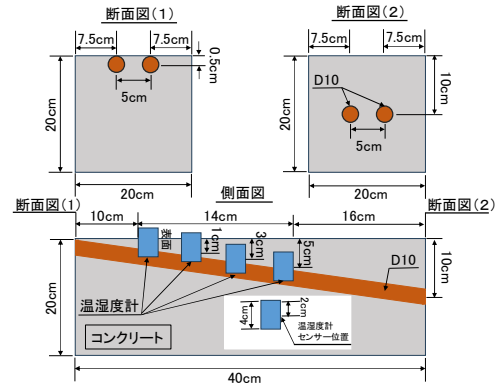


図-1 供試体

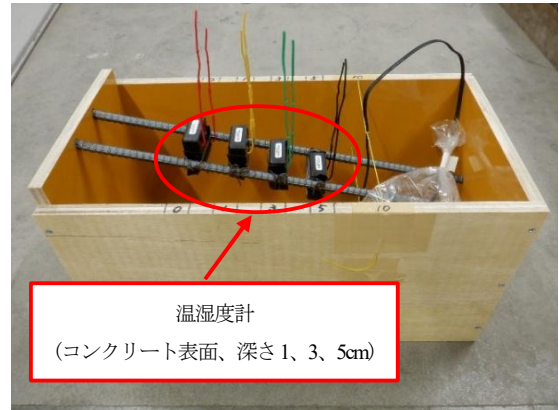


写真-2 温湿度計の配置

表-1 コンクリートの配合

W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				空気量 (%)
	水	セメント	細骨材	粗骨材	
55	155	282	861	1041	5.8



写真-3 陸別町小利別・温湿度計埋設供試体設置

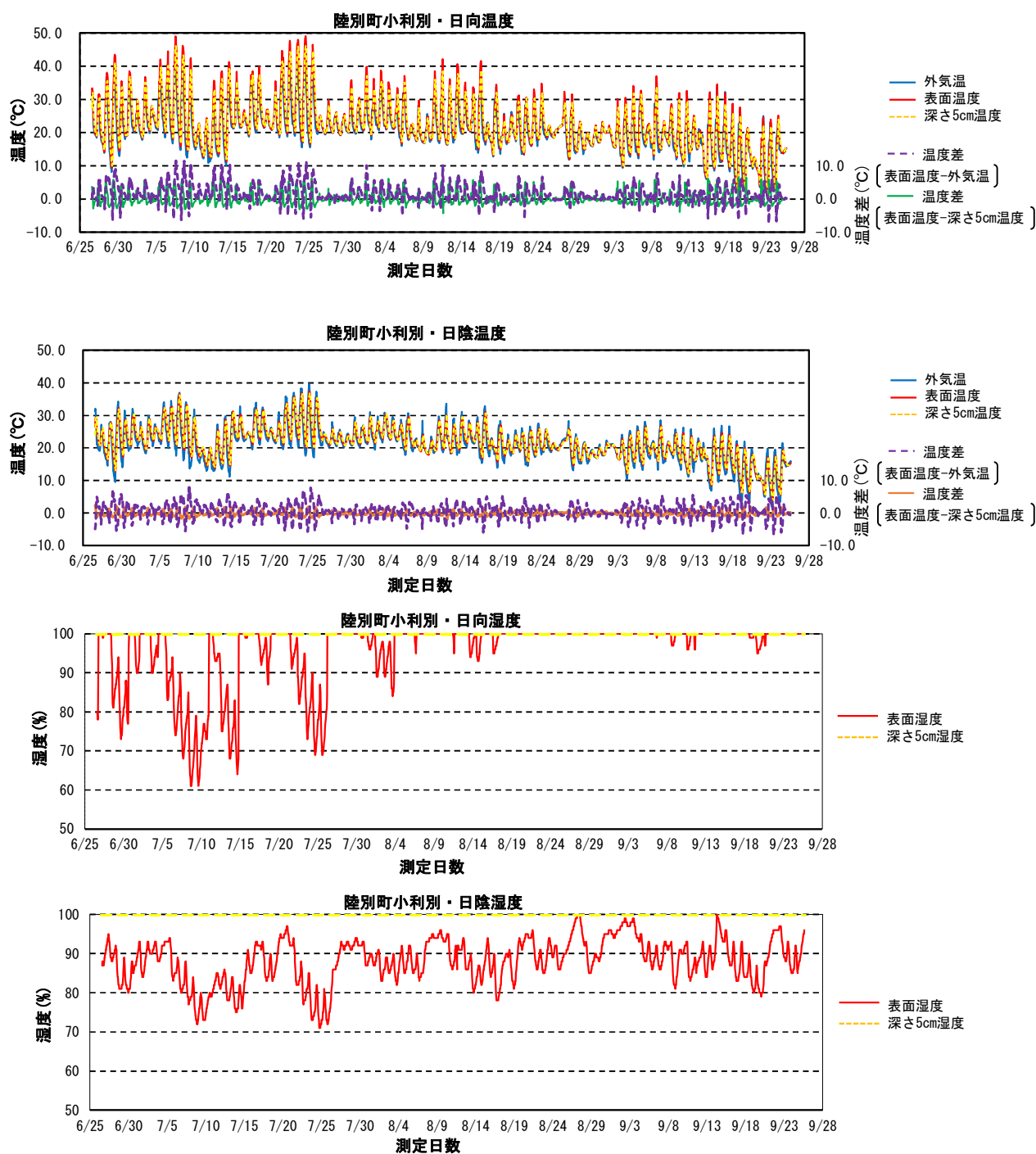


図2 小利別暴露実験場（陸別町小利別）での温湿度の測定結果

### 3. 温度および湿度の異なる環境条件下でのASRの進行に関する検討

次に、温度および湿度条件の相違がASRの進行に及ぼす影響について検討を行った。各温度、湿度条件は、第2章で行った暴露実験での測定結果をもとに設定した。

#### (1) 実験概要

##### a) 供試体の作製

既報<sup>3)</sup>を参考に、図-3に示す供試体を作製した。寸法は10cm×10cm×40cmとし、拘束を与えるため、鉄

筋を配した。鉄筋は、ASRの進行に及ぼす腐食ひび割れの影響を排除するため、エポキシ樹脂塗装鉄筋(D13)を用いた。

表-2にコンクリートの配合を示す。水セメント比(W/C)は55%とし、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。細骨材は苫小牧産の海砂(表乾密度2.71g/cm<sup>3</sup>、吸水率0.77%、除塩処理済)、粗骨材は最大寸法20mmの北海道産反応性骨材(表乾密度2.70g/cm<sup>3</sup>、吸水率1.72%)を用いた。ここでは、ASRが発生しやすい



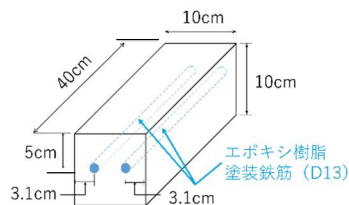


図3 ASR発生をさせる供試体

表2 コンクリートの配合

W/C (%)	単位量(kg/m³)					空気量 (%)
	水	セメント	細骨材	粗骨材	NaCl	
55	155	282	854	1052	15	4.8

い状態にするため、上田らの研究<sup>5)</sup>を参考に、アルカリとしてNaClを15kg/m³混入した。打設後、打設面を湿布養生し、翌日脱型を行い6日間湿布養生を行った。養生終了後は、材齢28日まで温度20℃、湿度60%の恒温恒湿室に静置した<sup>6)</sup>。

#### b) 温度、湿度の異なる環境条件の設定

53cm×75cm×49cmの水槽を断熱材で囲って、簡易な断熱空間を作製し、材齢28日を経た供試体を静置して、ASRの進行性を調べた。温度条件は、第2章の暴露実験で計測された結果をもとに40℃、50℃を設定し、これに加えて、さらに10℃高めた60℃と、10℃下げた30℃も設定した。また、北海道が寒冷地であることも考慮し、春期、秋期を模した温度10℃を条件として設定した。

一方、湿度の条件は、コンクリート内部の湿度が常時100%（飽和状態）であったことから、100%の条件として常時水中に浸漬させるケースを設定した。また、日陰環境では表面の相対湿度が概ね85%で推移していたことを踏まえ、湿度85%を設定した。さらに、日向環境では表面の相対湿度が約65%まで低下していたことから、乾燥条件として湿度65%を設定した。

これらの条件をふまえて、温度、湿度が異なる環境変化サイクルを図4のように設定し、各空間に供試体を静置し、それぞれの環境条件下でのASRの促進傾向について検討を行った。なお、温度はセンサー付きヒーターを使用、湿度に関しては写真4に示すように調整している。

#### c) 供試体の長さ変化率

供試体の長さ変化は、写真5に示すように電子ノギスを用いて計測した。なお、計測の24時間前に20±2℃で保管してから計測を行っている。試験開始前の供試体の長さを0.00と定義し、図4で示した32条件の環境下に静置した供試体におけるASRの進行性を長さ変化率により評価した。以降、本稿では、温度●℃、湿度■%の環境空間のことを「●-■」と略記することとする。

### (2) 実験結果・考察

#### a) 湿度条件を一定にしたASR促進検討

湿度条件を一定に保持した図4のパターン1における長さ変化率を図5に示す。

- は、温度●℃、湿度■%の環境を表す
- パターン2～5は、56日周期で環境を変化させている
- パターン2と3、および、パターン4と5は、評価の着眼点は同じであるが収容スペースの都合上、試験開始直後に与える環境は統一させていない

パターン1	温度および湿度を常に一定	60-100			
		60-85			
		60-65			
		50-100			
		50-85			
		50-65			
		40-100			
		40-85			
		40-65			
		30-100			
パターン2	湿度を周期的に変化	60-100			
		60-85	60-100	60-85	60-85
		50-100	50-85	50-100	50-85
		40-100	40-85	40-100	40-85
		40-100	40-65	40-100	40-65
		30-100	30-85	30-100	30-85
		30-100	30-65	30-100	30-65
		60-65	60-100	60-65	60-100
		50-65	50-100	50-65	50-100
		60-65	温度10℃	60-65	温度10℃
パターン3	春期、秋期を想定した低温作用を周期的に与える	50-65	温度10℃	50-65	温度10℃
		40-100	温度10℃	40-100	温度10℃
		40-85	温度10℃	40-85	温度10℃
		40-65	温度10℃	40-65	温度10℃
		30-100	温度10℃	30-100	温度10℃
		30-85	温度10℃	30-85	温度10℃
		30-65	温度10℃	30-65	温度10℃
		温度10℃	60-100	温度10℃	60-100
		温度10℃	60-85	温度10℃	60-85
		温度10℃	50-100	温度10℃	50-100
パターン4		温度10℃	50-85	温度10℃	50-85
		温度10℃	50-85	温度10℃	50-85
		温度10℃	50-85	温度10℃	50-85
		温度10℃	50-85	温度10℃	50-85

図4 温度、湿度が異なる環境変化サイクル

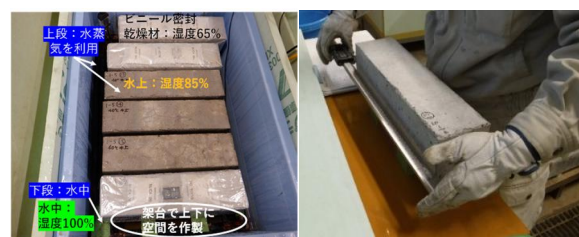


写真4 促進状況

写真5 供試体の長さ測定

湿度65%の環境では収縮を示し、ASRの促進は確認されなかった。湿度100%および85%の条件下では、温度60℃および50℃において、試験開始後56日目までは急速な膨張が観察されたものの、その後の膨張傾向は緩やかに転じる傾向が示された。また、湿度100%に比べると湿度85%の方が長さ変化率は大きく、特に50-85は全条件の中で最大の長さ変化を呈した。

一方、40-100では急速な膨張は確認されなかったが、40-85では28日以降に膨張が急速に進み、196日目経過時点では50-85と同程度の膨張率を示している。また、この条件は196日が経過した現時点において収束傾向は認められていない。30-100および30-85では、膨張率に顕著

な差異はみられないものの、いずれも線形的な膨張挙動を示し、現時点では60-100および60-85と同水準に達し、196日が経過した現時点も収束傾向は確認されていない。

今回の結果では、温度60℃および50℃の条件では、初期段階で膨張が急速に増大した後に収束する傾向が示される一方、温度40℃および30℃の条件では、ASRが緩やかに進行し収束が遅い傾向が示された。また、湿度65%ではASRは促進せず、湿度100%（水中）よりも湿度85%の方がASRを促進させる結果となった。

#### b) 湿度条件に変化を与えたASR促進検討

湿度を周期的に変化させた場合の長さ変化率について、パターン2の結果を図-6に示す。

湿度100%から85%へと環境条件を変化させたケースでは、温度60℃および50℃において、試験開始後56日目までは急速な膨張が観察されたが、その後は収束傾向が認められた。温度40℃では湿度変化を与えなかった40-85と同様に、28日以降に膨張が進行し、その後は長さの変化が小康状態にある。また、温度30℃においても膨張が概ね線形的に進行していた。湿度変化を与えないケースと比較すると、いずれの条件下においても膨張率は低下したが、温度40℃、湿度100%から85%への環境条件の変化が現時点では膨張が大きく、湿度85%の環境はASRを促進される傾向にあることも実験的に示された。

100%から65%へと環境条件を変化させたケースでは、湿度65%時点で長さ変化率が停滞もしくは収縮へ転じた。これはASRの進行に影響を及ぼす水分が減少したこと、ASRの促進が一時的に止まったものと推察される。その後、長さ変化率は0.05%のままで推移し、収束の兆候も観察された。温度の違いでは、温度40℃では長さ変化が徐々に膨張傾向を呈した。温度30℃のケースでは、膨張時に顕著な変化は認められなかった。なお、本ケースにおいても、温度が40℃一定で、湿度が85～100%の間で変化する環境が現時点で最大の膨張を呈した。

次に、パターン3の結果を図-7に示す。温度が60℃および50℃では湿度65%から試験を開始したため、いずれの温度でも、初期の28日はASRが促進しなかったが、湿度65%から湿度100%へ変化する環境では同様の膨張傾向を呈している。以上から、湿度変化をさせた場合、湿度一定の場合より全体的に膨張率は低下し、湿度の変化量が大きいほど膨張率が低下して停滞する傾向も

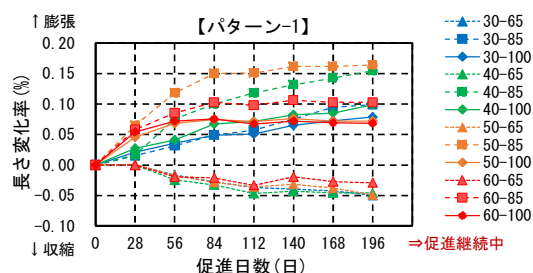


図-5 ASR促進グラフ：湿度条件一定

SHIRAI Yoshiaki, ENDOH Hirotake, YOSHIDA Susumu

確認されたが、膨張傾向を示すものも確認されていることから、今後も経時観察が必要である。

#### c) 温度条件に変化を与えたASR促進検討

春期と秋期を模し、促進試験の途中で温度を10℃に変化させる作用を繰り返した場合の長さ変化率について、パターン4の結果を図-8示す。なお、温度10℃の湿度は、本稿では考慮（計測）しなかった。

湿度65%のケースでは、すべての条件において温度を10℃に変化させた場合、長さ変化率は収縮を示した。湿度変化を与えなかったケースと挙動が近く、前述b)と同様、湿度65%では水分が供給されず、また温度10℃では温度が低く、ASRが促進しないためと推察できる。湿度85%と100%のケースでは、40℃と10℃の繰返し作用において、測定初期では急速な膨張は確認されなかったものの、促進日数の増加に伴って膨張が増加しており、ASRが促進されていることが示唆された。一方、30℃と10℃の繰返しでは、温度変化とともに長さ変化が上下するだけでASRは促進しなかった。

次に、パターン5の結果を図-9に示す。温度10℃から開始して、50℃または60℃と温度変化を繰返し作用させたケースでは初期の28日間はASRが進行しなかったが、28日以降長さ変化率は膨張を示し、56日以降は収束傾向を示した。以上から温度10℃ではASRは進行しないが、40℃以上で湿度85%以上の条件が繰返し作用する場合、経時的にASRが進行することが示された。

また、本条件下においても、膨張率の最大値は40-85であった。

本実験の範囲で得られたASRの促進を整理すると図-10ようになる。なお、温度30℃についてはASRの進行が遅く、今後進行する可能性があり、経過観察が必要である。第2章の結果を考慮すると、寒冷地では、緩やかにASRが進行している可能性が考えられる。

## 4. まとめ

本稿では、北海道における暴露実験から得られた温度および湿度条件を基準とし、温度、湿度がASRの進行に及ぼす影響を検討した。その結果を以下に述べる。

- (I) コンクリート表面温度は日向では、最大約50℃、概ね40℃前後で推移し、表面と深さ5cmでは約5℃の温度差があった。日陰では表面温度は最大約40℃、多くは約30℃で推移し、表面と深さ5cmの温度差はほとんど見られなかった。

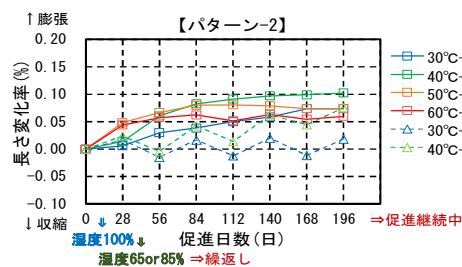


図-6 ASR促進グラフ：湿度変化 (1)

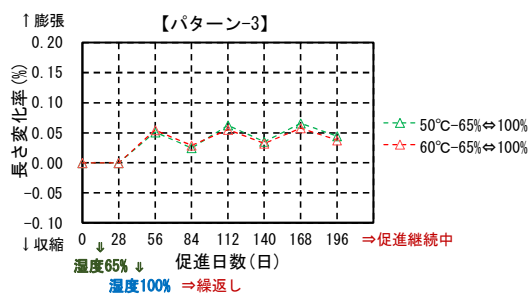


図-7 ASR促進グラフ：湿度変化 (2)

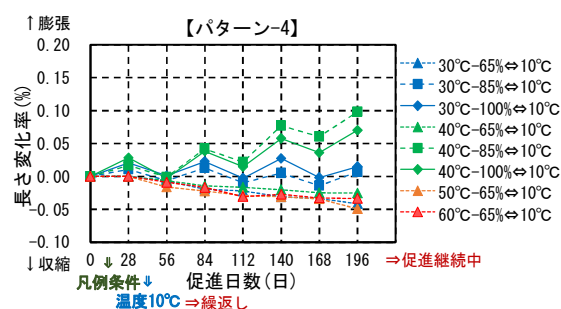


図-8 ASR促進グラフ：温度変化 (1)

- (2) 日向ではコンクリート表面は、乾湿の繰り返しが生じていることが確認された。日陰部では、概ね湿度85%で推移した。深さ5cmにおいては、湿度が常に飽和状態であった。
- (3) 湿度が一定のケースでは、温度60°Cおよび50°Cの条件下では、初期にASRが急速に進行したものの、その後は反応速度が低下し、収束傾向を示した。また、温度40°Cおよび30°Cでは、時間経過とともにASRが徐々に進行し、明確な収束傾向は認められず、緩やかに反応が促進されることが確認された。いずれの温度でも湿度65%ではASRは進行しなかった。
- (4) 湿度、温度に繰返し変化を与えたケースでは、湿度65%および温度10°Cの環境下でASRの進行が止まり、長さ変化が減少した。温度60°Cおよび50°Cでは膨張率が低下し停滞する傾向がみられたが、膨張傾向も確認されていることから、経過観察が必要である、また、温度30°CについてはASRの進行が遅く、今後進行する可能性があり、経過観察が必要である。
- (5) 寒冷地域の北海道でもASRが緩やかに促進している可能性が示唆された。

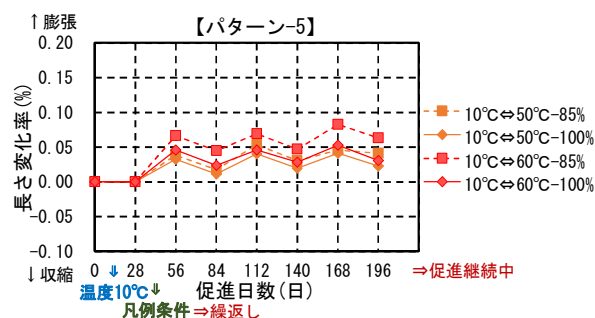


図-9 ASR促進グラフ：温度変化 (2)

温度	30°C	40°C	50°C	60°C
湿度				
65%	×	×	×	×
85%	○	○	○	○
100%	○	○	○	○
湿度変化				
100%⇔65%	△	○	—	—
100%⇔85%	○	○	○	○
65%⇔100%	—	—	○	○
温度変化				
65%⇔10°C	×	×	×	×
85%⇔10°C	△	○	—	—
100%⇔10°C	△	○	—	—
10°C⇔85%	—	—	○	○
10°C⇔100%	—	—	○	○

凡例○：促進、△：可能性示唆、×：促進しない

図-10 ASR促進結果

## 5. 今後の課題

本稿で述べた温度、湿度に着眼した実験結果よりASRが促進しやすい環境条件を整理することができた。温度40度および30°CではASRの促進が続いていると推察されることから、今後も経時観察が必要である。

今後は、アルカリ総量の変化やさらなる詳細な湿度条件の影響についても検討を進める必要がある。

## 参考文献

- 1) 栗林健一、米倉亜州夫、伊藤秀敏、牛尾正孝：アルカリ骨材反応を生じたコンクリート擁壁の劣化性状、コンクリート工学年次論文集、Vol.24、No.1、pp、585-590、2002。
- 2) 米倉亜州夫、伊藤秀敏、政所暢利、：アルカリ骨材反応によるコンクリートの膨張に及ぼす影響、広島工業大学紀要研究編、第41巻、pp、53-60、2007。

- 3) 遠藤裕丈、島多昭典：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、第65回北海道開発技術研究発表会、推進8、2022.2
- 4) 国立天文台ホームページ：  
<https://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/dni/2024/dni00.htm>、2025.12 (2025年12月12日確認)
- 5) 上田隆雄、園田胡桃、中山一秀、塚越雅幸：ASR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) 遠藤裕丈、長谷川諒、島多昭典：周辺環境がASRによるコンクリートの劣化に及ぼす影響およびASR対策、寒地土木研究所月報、No.839、pp28-38、2021