

論文 低温条件 (10 °C) の室内試験における ASR の膨張挙動および内部ひび割れ性状

北川 空良*1・佐川 康貴*2・山田 一夫*3・川上 隆*4

要旨: アルカリシリカ反応 (ASR) は高アルカリ濃度・高温・高湿環境下で促進されることから, 室内試験は各種促進条件下で行う。しかし, 温度が ASR による骨材のひび割れパターンに影響することなどの原因により, 促進条件次第では, ASR による劣化を過小評価してしまう可能性がある。そこで本研究では, ASR において比較的低温下 (10 °C) と, 10 °C と 40 °C の温度サイクルを与える 2 種類の養生温度で, コンクリート角柱による膨張試験を行った。その結果, 温度条件で骨材およびセメントペースト部のひび割れパターンと ASR による膨張挙動が異なり, 緩い反応条件の方が効率的に膨張に寄与する可能性があると考えられた。

キーワード: アルカリシリカ反応, 低温養生, アルカリシリカゲル, ひび割れ, ペシマム混合率

1. はじめに

骨材のアルカリ反応性評価の室内試験のうち, コンクリートで角柱供試体を作製し, アルカリシリカ反応 (ASR) の促進のために, 温度と湿度を高め, アルカリ総量を多くするコンクリートプリズム試験 (CPT) が現在で最も信頼性が高いと考えられている¹⁾。これは, 日本で一般的に用いられている手法である。骨材単体で反応性を評価する化学法やモルタルバー法は簡易的ではあるが, 試験期間の短さやペシマム現象と混和材の効果を考慮できない点などから, 構造物の ASR 挙動予測としては限界があるためである。CPT の試験手順も, 長期間にわたる安定した促進条件を実現するため, ASR 膨張の評価に影響するアルカリ溶脱や供試体の乾燥等の課題点に対応するため改訂を重ねてきた²⁾。

これらの従来の CPT の課題を踏まえ, 空隙水中のアルカリ濃度を推定し, それと同等の濃度の NaOH 水溶液を含む保水材で供試体を包み, さらに乾燥を防ぐため遮水性フィルムで被覆する手法 (アルカリラッピング) が提唱され, RILEM AAR-13³⁾ に制定された。この AAR-13 では, 促進温度は定められておらず, 骨材の反応性にに応じて決定することが望ましいとされている。促進温度を比較した事例としては, 大澤ら⁴⁾の実施した, 養生温度が 38 °C と 60 °C で行った CPT の結果では, 促進開始直後は 60 °C 養生の供試体が大きく膨張したが, 促進 8 週で 38 °C 養生が 60 °C 養生した供試体よりも大きい膨張率を示したとの報告がある。この研究で, 促進温度によって, アルカリシリカゲル (ASG) の生成状況が異なることが認められ, 高温促進下では, 供試体内部で生成される ASG よりも, 相対的に供試体外部に滲出する ASG の

量が多いことがこの膨張挙動の原因であると示唆された。このように, より厳しい促進条件が, ASR によるより大きな膨張を引き起こすわけではないという結果は, 俵積田ら⁵⁾によっても報告され, より緩い促進条件の方が, 生成された ASG が供試体内部に累積しやすく, より大きな ASR 膨張を生じる場合もある。

実構造物においても, カナダの寒冷地のダムで, 長期間の ASR 膨張による劣化が問題になっており, Bérubéら⁶⁾は骨材からのアルカリ溶出の影響を挙げているが, アルカリ溶出が空隙水中の pH 上昇を必ずしも意味しないため⁷⁾, その主張に懐疑的な意見もある。いずれにせよ寒冷地においても, ASR は確認され, 特に ASR の低温側での温度依存性については議論の余地が残っている。

温度は膨張挙動に限らず, 骨材のひび割れパターンにも影響を及ぼす⁸⁾。CPT を 20 °C 養生と 60 °C 養生で行い, ひび割れパターンを偏光顕微鏡で観察したところ, 60 °C では骨材を貫くひび割れが, 20 °C では骨材の外周部に沿ったひび割れが多く認められ, 反応生成物が膨張を引き起こす効率 (膨張効率) の違いが指摘された。このように温度が ASR による内部ひび割れ性状と膨張効率に影響を及ぼすことから, アルカリ反応性評価において温度を考慮することが極めて重要だと言える。

そこで本研究では, 従来高温条件で行われる CPT を, 低温条件 (10 °C) と, 10 °C と 40 °C の温度サイクルを与える 2 種類の養生温度で, RILEM AAR-13 に準拠し行った。長さ変化の測定および ASG の生成状況の観察と内部ひび割れの可視化を行い, 低温条件下での ASR によるコンクリートの膨張挙動, ASG の生成状況および損傷の過程を実験的に考察した。

*1 九州大学大学院 工学府土木工学専攻 (学生会員)

*2 九州大学大学院 工学研究院社会基盤部門 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 国立環境研究所 福島地域協働研究拠点 フェロー 博士 (工学) (フェロー会員)

*4 九州大学大学院 工学府土木工学専攻 修士 (工学) (学生会員)

2. 試験概要

2.1 反応性骨材

本研究では、低温での ASR を評価するため、ASR 反応性が極めて高い安山岩を使用した。この骨材は俵積田ら⁹⁾が使用した骨材と同一である。写真-1 に示す偏光顕微鏡写真¹⁰⁾によると、オパール (Op)、カルセドニー (Ch) および炭酸塩鉱物 (Car) を含むことがわかる。

JIS A 1145 「骨材のアルカリ反応試験方法 (化学法)」および JIS A 1146 「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (モルタルバー法)」の結果について、化学法では、Sc=784 mmol/L, Rc=149 mmol/L を示し、「無害でない」と判定された。モルタルバー法では、促進期間 26 週時点で、膨張率が 0.228% であり、判定基準の 0.100% を大きく上回り、同じく「無害でない」と判定された。

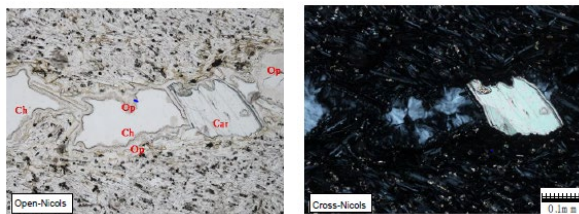


写真-1 偏光顕微鏡写真¹⁰⁾
(左：単ニコル，右：直交ニコル)

2.2 試験配合と養生温度

表-1 にコンクリート供試体の配合と養生温度を示す。供試体名は「反応性骨材混合率-アルカリ総量」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)、細骨材は非反応性骨材の石灰石砕砂 (表乾密度 2.64 g/cm³) を使用した。粗骨材 G (最大寸法 20 mm) は反応性骨材 R と非反応性骨材 L の 2 種類の骨材を使用した。反応性骨材は 2.1 で示した安山岩の骨材 (表乾密度 2.52 g/cm³) を、非反応性骨材は石灰石砕石 (表乾密度 2.70 g/cm³) を使用した。

水セメント比、細骨材率および単位水量はそれぞれ、W/C=50%, s/a=45%, 160 kg/m³ とした。アルカリ総量は Na₂O 換算で、国際規格の標準である 5.5 kg/m³ と、日本で ASR 抑制対策として基準となる 3.0 kg/m³ になるように、粒状 NaOH 試薬を練混ぜ水に溶解させて調整した。すべ

てのコンクリートプリズムの寸法は、75×75×250 mm とした。

養生方法について、AAR-13 を参考に、空隙水中のアルカリ濃度を算出し、その濃度の NaOH 水溶液を 50.0 g 含んだ不織布で供試体を包み、遮水性フィルムで被覆を行った (以降 AW, Alkali-Wrapped)。算出した NaOH 水溶液の濃度は、アルカリ総量が 5.5 kg/m³ の供試体は、1.33 mol/L, 3.0 kg/m³ の供試体は、0.72 mol/L である。供試体はすべて、打設から 24 時間後に脱型した後 AW を適用した。養生温度は 10℃ と、10℃ と 40℃ の温度サイクルを与えた 2 種類実施した。温度サイクルを与えた供試体は、脱型後 10℃ に、その後材齢 20 週まで 2 週間おきに 10℃ と 40℃ 環境に静置した。20 週以降は 4 週おきに 10℃ と 40℃ に静置した (以降 TC, Temperature Cycle)。

2.3 長さ変化と質量測定

長さ測定は 20℃ の室内でダイヤルゲージ法にて、1 水準当たり供試体 3 体を測定した。10℃ 養生の供試体は、温度が極力変わらないように、保管場所から取り出して 3 分以内に測定した。TC の供試体は、予冷 (測定 24 時間前に供試体を測定室に移し環境温度に合わせる) を行った。また、長さ変化を測定すると同時に質量を測定した。AW は測定ごとに、不織布が含む NaOH 水溶液の質量が 50.0 g になるように蒸留水を添加し調整した。

2.4 供試体内部の ASG およびひび割れ観察

断面観察用に作製した供試体を所定の材齢にて湿式カッターで約 20 mm の厚さに切断し、五十嵐らによるゲルフルオレッセンス法¹¹⁾を参考にして、内部の ASG を観察した。切断後、観察面を湿式研磨し、その後、10℃ 環境で湿気箱の中に観察面を上に向けた状態で 1 週間静置させた。観察片を 20℃、相対湿度 60% の環境に取り出し、観察面を乾燥させてから、ASG 呈色試薬を塗布し、暗室下で UV (紫外線:波長 254 nm) 照射し撮影を行った。ゲルフルオレッセンス法で観察した後、同一面に、蛍光塗料を混ぜたエポキシ樹脂を真空含浸させ、研磨後に UV (波長 365 nm) 照射しひび割れ観察を行った。

3. 結果および考察

3.1 膨張率と質量変化

表-1 配合および養生温度

| 供試体名 | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | 添加 NaOH (g/m ³) | 養生温度 | アルカリ総量 (kg/m ³) |
|-----------|---------|---------|--------------------------|--------|-------|-------|-----|-----------------------------|---------|-----------------------------|
| | | | 水 W | セメント C | 細骨材 S | 粗骨材 G | | | | |
| | | | | | | R | L | | | |
| 100%-5.5 | 50 | 45 | 160 | 320 | 824 | 962 | - | 4785 | 10℃ | 5.5 |
| 30%-5.5 | 50 | 45 | 160 | 320 | 824 | 288 | 721 | 4785 | 10℃ | 5.5 |
| 30%-5.5TC | 50 | 45 | 160 | 320 | 824 | 288 | 721 | 4785 | 10℃⇔40℃ | 5.5 |
| 30%-3.0 | 50 | 45 | 160 | 320 | 824 | 288 | 721 | 1559 | 10℃ | 3.0 |

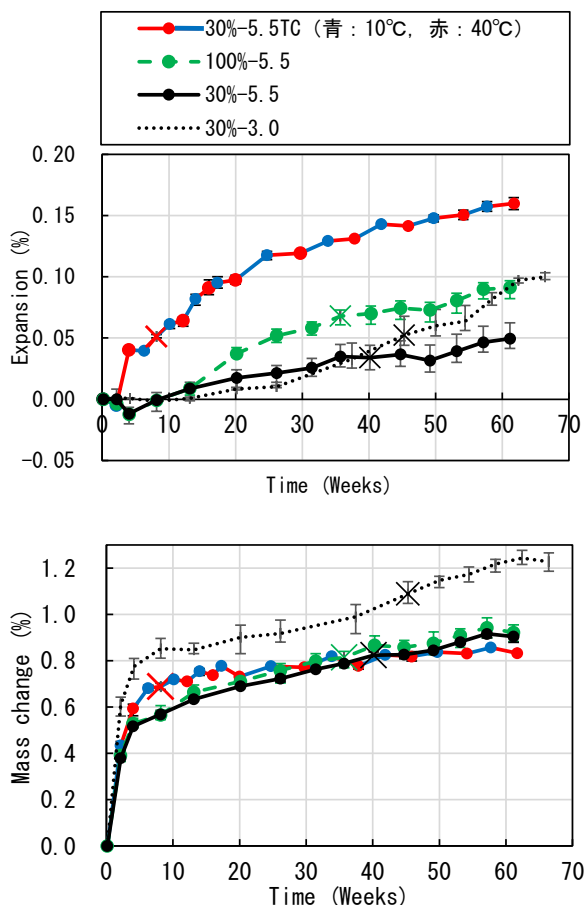


図-1 膨張試験結果
(上：膨張率，下：質量変化率)

図-1に膨張試験の結果を示す。図中×印は供試体表面に目視可能なひび割れを確認した材齢である。

30%-5.5TCに着目すると、膨張率は、材齢8週で供試体表面に目視可能なひび割れが確認される前は、40℃養生期間で増加し、10℃養生期間では一定であった。しかし、材齢8週でひび割れ確認後は、10℃期間で増加し、40℃期間では一定で、膨張の有無がひび割れ前と逆転する結果となった。質量変化率は、材齢8週前まではいずれの温度でも増加したが、材齢8週以降40℃養生期間で減少し、10℃養生期間で増加していることから、40℃養生期間ではASGが供試体外部に多く滲出していることが考えられる。以上のことから、40℃の高温環境では、生成されたASGの流動性が高く、ASGが骨材からセメントペースト部に、さらに供試体外へ滲出する量が、10℃の低温環境よりも多くなると推察される。結果として、40℃環境ではASRはより進行するものの、ASGの滲出により膨張圧が蓄積しにくくなり、ひび割れ前後で温度によって膨張の挙動が変化したと考えられる。

そのため、供試体表面にひび割れが確認された後の加温（本研究では10℃から40℃）は、ASGの供試体外への滲出を促し、ASRによる膨張を過小評価してしまう

可能性を示唆し、室内試験における促進温度の決定には、損傷と温度を複合的に考慮する必要があるといえる。

次に10℃養生の100%-5.5, 30%-5.5および30%-3.0の膨張率と質量変化率を比較する。膨張率に関して、材齢13週以降に差が確認された。100%-5.5が30%-5.5より大きい膨張率を示した。また、ひび割れ確認以降は30%-3.0が他の水準より大きく膨張し、材齢60週では100%-5.5を超える結果となった。より長期材齢では30%-5.5TCも超える可能性も考えられる。

100%-5.5が30%-5.5より大きい膨張率を示したのは、アルカリ総量が十分に大きい条件で反応性骨材の割合が多く、生成されるASGが多くなったことが原因と考えられる。このように材齢初期に反応性骨材を多く含む方が、初期の膨張率が大きいことは既往の研究¹²⁾においても確認され、この骨材は、40℃促進のコンクリート試験でペシマム混合率が30%と確認された。しかし今回のような10℃養生でASRが緩やかに進む場合、ASRによって消費されるアルカリも緩やかに減少するため、反応性骨材率が高くとも長期間ASRが生じ、ペシマム混合率が大きい側へと推移したと考えられる。

30%-3.0について、100%-5.5と30%-5.5よりも遅れて膨張し始めているが、材齢26週以降の膨張率の伸び幅は大きい。また、ひび割れが確認された材齢も45週と最も遅い。これは、アルカリ総量が小さいので、生成されるASGが少なくなるが、その分セメントペースト部および供試体外へのASGの滲出も少なく、膨張圧を蓄積しやすくなった結果、このような膨張挙動を示した可能性を推定できる。

写真-2に30%-5.5TC(8週)と30%-3.0(75週)での供試体外観を示す。30%-5.5TCは供試体表面にひび割れが確認された材齢からASGが白く滲出している様子が目視で確認された。対して45週でひび割れが確認された30%-3.0は、75週段階でASGが供試体表面に滲出している様子は確認されない。質量増加も30%-3.0が最も大きい値を示しており、アルカリ総量が小さく、低温下で緩やかにASRが進むことでASGの滲出が少なくなり、質量増加が大きくなったと推察される。本研究では10℃を中心に試験を行ったが、促進温度にもペシマム現象があり、その挙動は評価材齢によっても変化することが既に報告されている¹³⁾。したがって、CPTの養生温度設定において、特に過度の高温促進には注意が必要である。

筆者らがこれまで、より厳しい促進条件で同じ骨材を評価してきた膨張試験の結果を図-2に示す。本研究で使用した骨材に関して、アルカリ総量による膨張挙動への影響は、60℃ではアルカリ総量が大きい方が全材齢で膨張率も大きくなったが、40℃では差が縮まり、20℃では材齢47週付近を境に、アルカリ総量が小さい方が

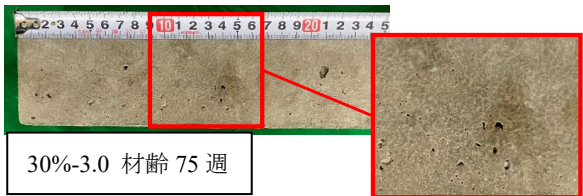
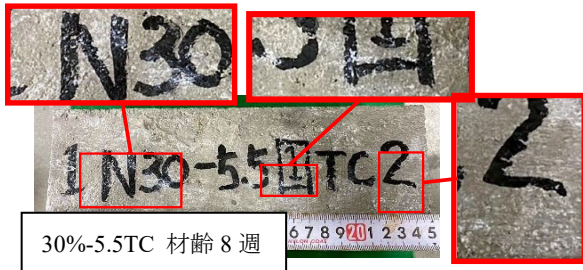


写真-2 供試体表面のASG 滲出状況

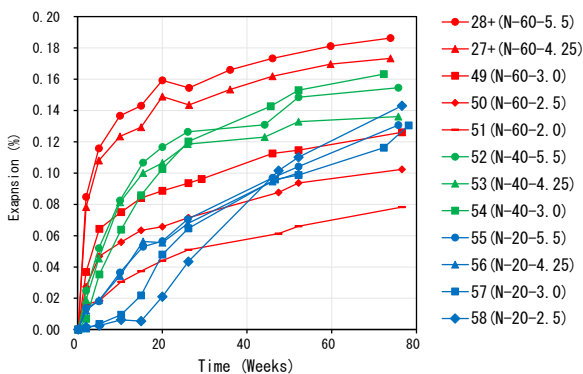


図-2 過去に実施された高温での検用例¹³⁾
(凡例：骨材-養生温度-アルカリ総量)

膨張率が大きくなった。10℃ではこの逆転現象が起きる材齢が40週であった。反応性が極めて高い骨材において、より緩やかな促進条件で長期的膨張率が大きくなるのであるから、より反応性が低い骨材であればさらに長期材齢においてこの現象が起きる可能性を推定することもできる。つまり、ゆっくりと反応する骨材を含むコンクリートを、アルカリ総量が少なく、低温で、湿潤な環境に長期に暴露すると最終的には最も膨張率が大きくなるという可能性を本実験結果の外挿として類推できる。

3.2 ゲルフルオレッセンス法によるASG観察

写真-3に各促進条件でひび割れ発生以前と最終材齢62週および66週でのコンクリートプリズム切断面のASGの蛍光観察結果を、図-3にはASG蛍光面積率を示す。ばらつきを考慮し観察は2断面行った。図-3より、すべての水準で供試体表面にひび割れが確認(図中×印)以降、ASGの蛍光面積が減少する傾向がみられた。100%-5.5と30%-5.5を比較すると、ひび割れが確認される材齢40週程度までは、膨張率の大きかった100%-5.5の方がASG蛍光面も大きかった。しかし、その後の62

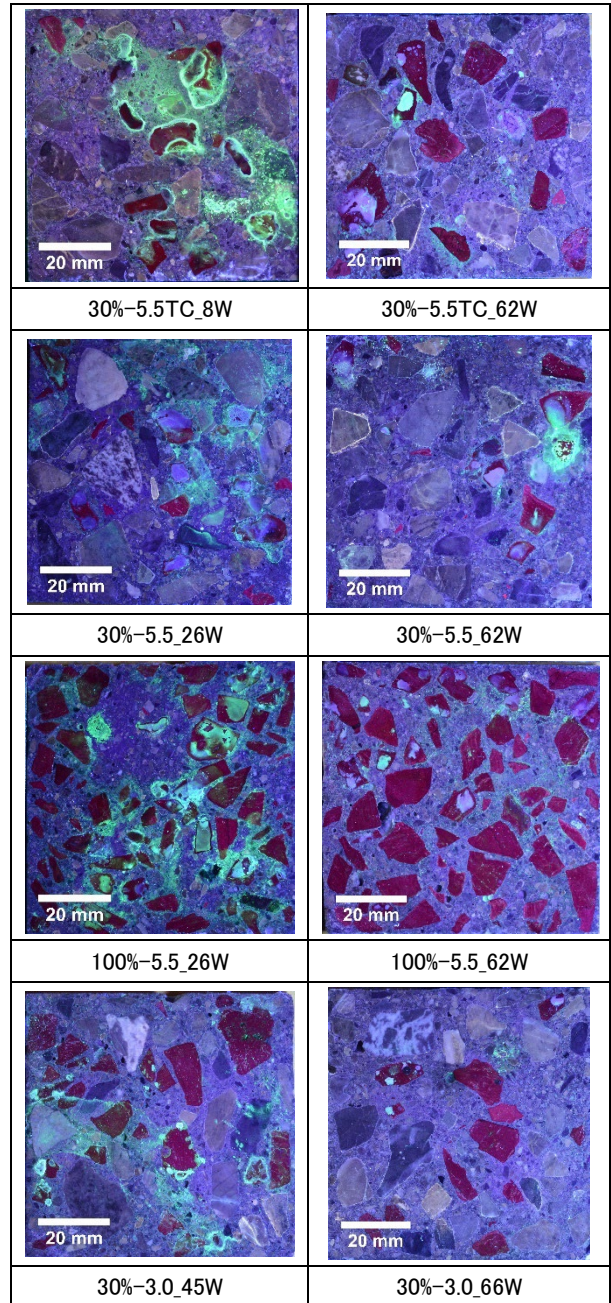


写真-3 ゲルフルオレッセンス法によるASG観察

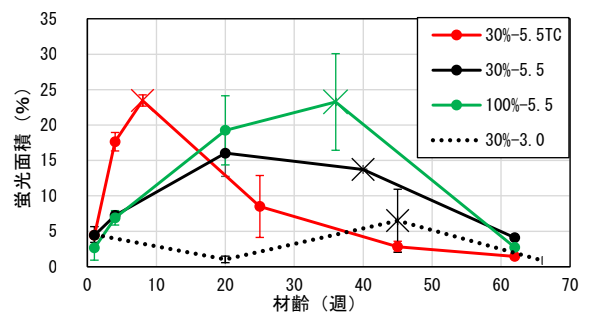


図-3 ゲルフルオレッセンス法によるASG蛍光面積

週での観察では両水準とも3%程度と低い値を示した。これは30%-3.0と30%-5.5TCでも同様の結果がみられた。しかし10℃養生している水準は、30%-5.5TCに比べて、

供試体表面観察により、滲出している ASG が少なく、質量変化率も常に増加傾向にあるので、ASG の供試体外への滲出の影響は 30%-5.5TC に比べ小さいものと考えられる。そこで、10℃ 養生の供試体でそれぞれ、ひび割れが確認された材齢の写真と 62 週および 64 週での写真を比較すると、少ない蛍光部のうち反応性骨材およびその周辺が多く占め、反応性骨材から離れた箇所のセメントペースト部では蛍光部がほとんど無かった。骨材からセメントペースト部に滲出した ASG がセメントペースト部で Ca イオンとイオン交換し、C-S-H ゲルとなり、ASG 呈色試薬中に含まれるウランイオンとイオン交換しない状態になったため、ASG 蛍光面積が減少したものと推察される。

このように、低温環境下では、ASG の流動性が低く、ASG が供試体内に留まりやすくなり、骨材からセメントペースト部に滲出した後、Ca イオンとイオン交換を行い、ゲルフルオレッセンス法による呈色試薬では蛍光発色しなくなる可能性を考えることができる。また、低温下では、ASG 蛍光面積が小さい場合でも、図-1 より今後大きく膨張する可能性があることがわかった。

3.3 蛍光樹脂含浸によるひび割れ観察

写真-4 に蛍光樹脂含浸による内部ひび割れ観察結果を示す。写真中のピンク枠はセメントペースト部のひび割れを、赤枠および黄枠は骨材のひび割れの拡大写真を示す。30%-5.5TC では、10℃ 養生した供試体に比べ、セメントペーストのひび割れ幅が大きく、その数は少ないことが確認された。また、写真内赤枠に示す骨材のように、骨材表層に沿うようにひびが入ったものと、黄色枠中の、骨材に対し横断するようにひびが入る 2 種類のひび割れが確認された。前述したように、Kawabata らの、本研究と同一の骨材を使用した研究⁸⁾では、20℃ 養生した供試体中の骨材では、骨材表層に沿うように入るひび割れが多く確認され、60℃ では、骨材を横断するように入るひび割れが多く確認された。本研究の 10℃ と 40℃ の温度サイクルを与えたコンクリートプリズムでは、この 2 種類のひび割れが混在していることが確認された。

一方で、10℃ 養生の供試体である 100%-5.5、30%-5.5 および 30%-3.0 は、骨材の表層に沿うタイプのひび割れのみ確認された。またセメントペースト部のひび割れについては、細かいひびが分散しており、30%-5.5TC より小さいひび割れが多く存在している結果となった。

さらに、10℃ 養生である 30%-3.0 のセメントペース

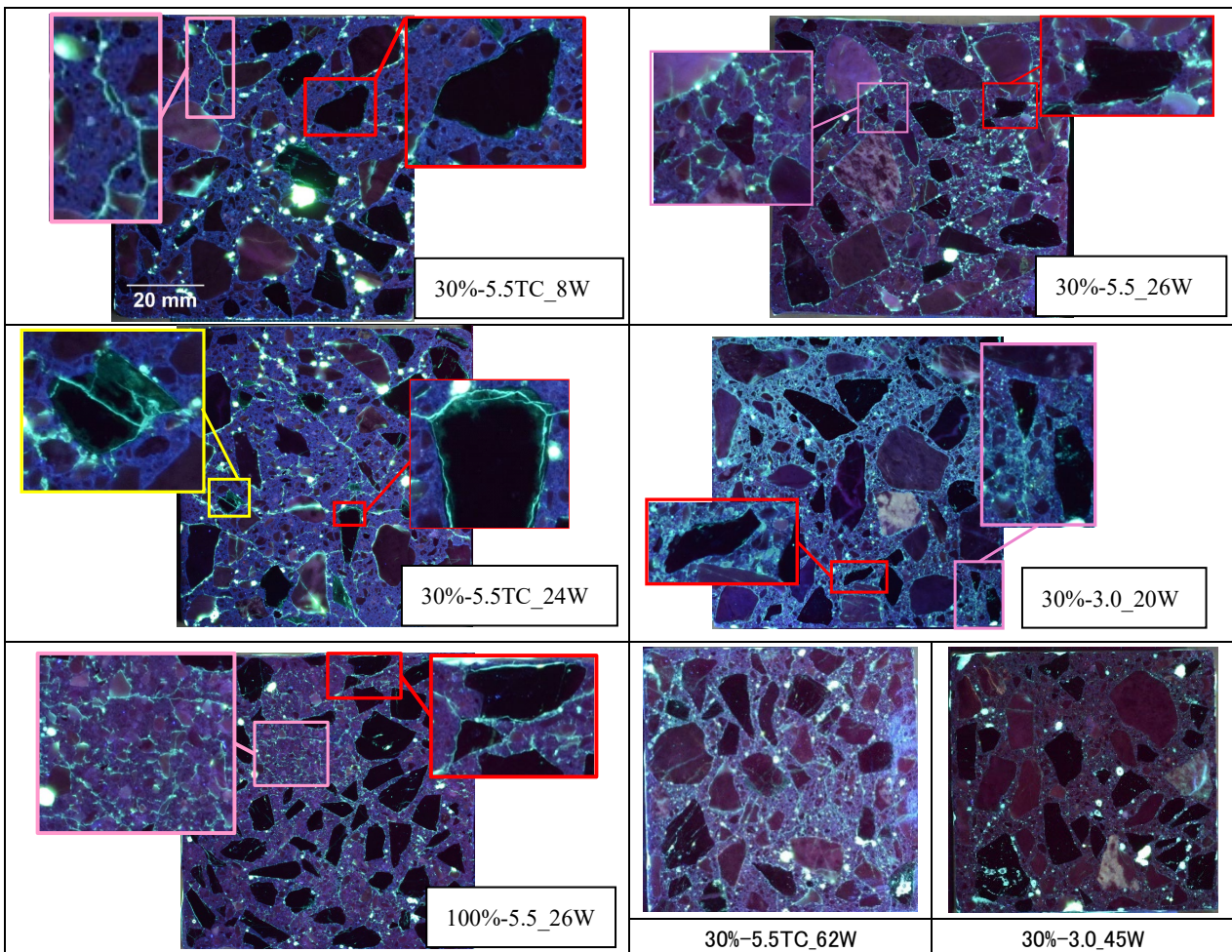


写真-4 蛍光樹脂含浸による内部ひび割れ観察

ト部のひび割れについて、材齢 20 週時点より 45 週のほうが、蛍光樹脂が含浸されている領域が減少している。これは、3.2 でのゲルフルオレッセンス法による蛍光面積が長期で減少する理由として推察した ASG がセメントペースト部で Ca 置換により C-S-H ゲルとなり、その結果 C-S-H ゲルがひび割れを閉塞することで樹脂が含浸しにくくなったことが原因と推察される。内部の ASG の性状について、本研究では、偏光顕微鏡による観察や組成の特定は実施しておらず、推察の段階にある。低温環境下において供試体内部で経時的に変化していく ASG の観察および分析をしていくことが今後の課題である。

4. まとめ

本研究では、ペシマム現象を有する反応性骨材を用いて、10℃養生および10℃と40℃の温度サイクルを与える2種類の温度条件でCPTを行い、温度による膨張挙動の違いを実験的に考察した。また、コンクリートプリズム内部のASGと内部ひび割れ状況の観察を行い、温度がASG生成とひび割れ性状に与える影響を調べた。

- (1) 低温養生（10℃）を行った本研究では、ペシマム混合率が、40℃養生した場合に比べ、大きい側へ推移する可能性がある。
- (2) 供試体表面にひび割れ発生後の供試体の加温（10℃から40℃）は、ASRを促進させASGの生成を促すが、必ずしも膨張の促進にはならなかった。また、その原因はASGが供試体外部に滲出することであると推察された。
- (3) 長期間低温養生した供試体のゲルフルオレッセンス法によるASG蛍光面積は、高温促進を行った場合と同様に低い値を示した。
- (4) 温度によって、骨材およびセメントペースト部に生じるひび割れ性状が異なった。また、本研究の緩慢な条件の供試体では、生成したASGがセメントペースト部でイオン交換によりC-S-Hゲルとなり、ひび割れを閉塞することで、長期で膨張圧を蓄積し継続した膨張を生じる原因となることが推察された。

謝辞 本研究の遂行にあたり、港湾空港技術研究所の川端雄一郎博士に示唆に富むご意見を頂きました。また名古屋大学准教授五十嵐豪博士に、実験手法における多大なご協力を頂きました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 山田一夫ほか: アルカリ骨材反応の抑制効果の評価方法と膨張予測の新しい考え方, 土木学会年次学術講演会公演概要集, Vol.69, pp.961-962, 2014
- 2) ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会: 委員会報

- 告書, 日本コンクリート工学会, Vol.36, No.1, 2014.7.
- 3) K. Yamada et al.: Recommendation of RILEM TC 258-AAA: RILEM AAR-13: application of alkali-wrapping for concrete prism testing to assess the expansion potential of alkali-silica reaction, *Materials and Structures*, Vol.54, 201, 2021
- 4) 大澤紀久, 五十嵐豪, 山田一夫, 西脇智哉: アルカリシリカ反応によるアルカリシリカゲルが膨張圧を発生する機構に関する基礎的研究, *セメント・コンクリート論文集*, Vol.71, pp.272-279, 2017
- 5) 俵積田新也, 山田一夫, 五十嵐豪, 佐川康貴: ASR 促進試験における促進条件がアルカリシリカゲルおよび膨張挙動に及ぼす影響, 第 73 回セメント技術大会, pp.144-145, 2019
- 6) M.A. Bérubé et al.: Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity, *Cement and Concrete Research*, Vol.32, pp.1215-1227, 2002
- 7) 池田隆徳, 濱田秀則, 佐川康貴, 山田一夫: 骨材からのアルカリ溶出性状と ASR による膨張に対する影響の評価, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.32, No.1, pp.917-922, 2010
- 8) Y. Kawabata et al. : Impact of temperature on expansive behavior of concrete with highly reactive andesite due to the alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research*, Vol.125, 105888, 2019
- 9) 俵積田新也, 山田一夫, 小川彰一, 佐川康貴: 3 年間の暴露試験に基づくアルカリ溶脱と ASR 膨張の関係性の検討, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.42, No.1, pp.743-748, 2020
- 10) K. Yamada, Y. Kawabata, T. Kawakami : Importance of petrographic diagnosis and a proposal of comprehensive management flow of concrete structures for alkali-aggregate reaction, 16th ICAAR, Lisbon, Portugal, 2022
- 11) 五十嵐豪, 山田一夫, 小川彰一: ゲルフルオレッセンス法による ASR ゲルの観察条件に関する一考察, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.38, No.1, pp.1047-1052, 2016
- 12) 佐川康貴, 山田一夫, 烏田慎也, 江里口玲: ペシマム現象を示す骨材を用いたコンクリートの加速試験および暴露試験における膨張挙動, *コンクリート工学論文集*, Vol.25, pp.135-145, 2014
- 13) K. Yamada et al. : Exact effects of temperature increase and alkali boosting in concrete prism tests with alkali wrapping, 15th ICAAR, Sao Paulo, Brazil, 2016