論文　コンクリートプリズムを用いたASR加速試験における養生温度およびアルカリ総量が膨張挙動に及ぼす影響

田中　暁大[*1]・山田　一夫[*2]・佐川　康貴[*3]・小川　彰一[*4]

要旨：本研究では，アルカリシリカ反応の膨張挙動の養生温度依存性およびアルカリ総量依存性を確認することを目的とし，コンクリートプリズムを用いた加速試験を行った。アルカリ総量を変化させた 75×75×250mm の供試体を複数作製し，表面からのアルカリ溶脱および乾燥を防止するためにアルカリ水溶液を含ませた不織布で表面を覆い，底部に水を張ったステンレス容器もしくはプラスチップ容器に格納した。20℃，40℃および 60℃で加速養生を行い，長さ変化を測定した。その結果，養生温度の違いにより膨張挙動のアルカリ総量への依存性が変化することが分かった。

キーワード：ASR，加速試験，温度依存性，アルカリ総量依存性，コンクリートプリズム，遅延膨張性骨材

1. はじめに

わが国では，アルカリシリカ反応（ASR）の抑制対策として，(1) アルカリ総量 3.0 kg/m^3 以下への規制，(2) 抑制効果のある混和材の使用，(3) 安全と認められる骨材の使用，の 3 点が示されている。これらの対策が導入された後に建設された構造物では確かに ASR の発生は大きく減少している。しかしながら，これらの対策を行ったにもかかわらずASRが生じた例[1)]が報告されている。原因として，ペシマム現象や遅延膨張性骨材の存在があげられるが，これらは従来のモルタルバー法や化学法では判定が困難であり，コンクリート供試体を使用した加速試験による ASR 反応性の評価が有効と考えられる。

佐川らの研究[2)]では，コンクリート供試体の養生の際に供試体を包む不織布の有無によって供試体からのアルカリ溶脱率が異なることが確認された。

そこで本研究では，コンクリート角柱供試体（コンクリートプリズム）を用いた促進試験として，RILEM AAR-4 “Detection of potential alkali-reactivity - Accelerated method for testing aggregate combinations using concrete prisms”の試験法を元にして，コンクリートプリズムを作製した。これに，アルカリ溶脱および乾燥の防止，水の安定供給を目的とした不織布で覆い，加速養生を行った。そして，所定の養生期間において ASR による膨張挙動を測定し，コンクリートプリズムのアルカリ総量および養生温度が膨張挙動へ及ぼす影響について検討した。

2. 使用骨材

2.1 岩石学的検討

骨材の ASR 反応特性は岩種や鉱物組成により異なり，適切な ASR 反応性検出試験法も異なる。そこで岩石学的観点からの骨材の観察を行うことによって岩種や鉱物組成を特定し，適切な ASR 反応性試験を行うことが提案されている[3)]。そこで本研究では，ASR 反応性を有する反応性骨材 A，B に対し偏光顕微鏡による観察および粉末 X 線回析を行い，構成鉱物を特定した。**表-1** に結果を示す。

骨材 A は偏光顕微鏡観察の結果，斑状組織を示す安山岩であり，ASR 反応性鉱物として多量のクリストバライトに加え，オパール，ガラスおよびカルセドニーを含みさらに炭酸塩鉱物の存在することが分かった。さらに粉末 X 線回析の結果，クリストバライトが高強度で検出され，炭酸塩鉱物は菱鉄鉱およびドロマイトであることが分かった。岩石中には微細な割れ目も多く，高い ASR 反応性を示すクリストバライトが多量に含まれていることから，骨材 A は ASR 反応性が高いことがうかがえる。

骨材 B は偏光顕微鏡観察の結果，非変性のチャートであり ASR 反応性鉱物としては主に隠微晶質石英からなり，カルセドニーからなる脈が分布することも分かった。隠微晶質石英は ASR による遅延膨張を起こす性質があり既存の試験法である JIS A 1145「骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法）」や 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）」では正確

表-1　骨材の種類および構成鉱物

骨材名	種類	ASR 反応性鉱物
骨材 A	安山岩	クリストバライト、オパール ガラス、カルセドニー
骨材 B	チャート	隠微晶質石英、カルセドニー

*1 九州大学大学院　工学府　建設システム工学専攻　（学生会員）
*2（独）国立環境研究所　資源循環・廃棄物研究センター　博士（工学）（正会員）
*3 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）
*4（株）太平洋コンサルタント　営業推進部　修士（薬学）（正会員）

な判定が行えない可能性がある [4]。また，チャートは ASTM C 1260：Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method) などの高温，高濃度のアルカリ溶液に浸漬する試験法では正確な判定ができない可能性がある [4]。

2.2 化学法による ASR 反応性の検討

骨材の反応性を確認するために，JIS 化学法を行った。**図-1** にその結果を示す。骨材 A は溶解シリカ量 Sc = 710 mmol/l，アルカリ濃度減少量 Rc = 168 mmol/l，骨材 B は Sc = 158 mmol/l，Rc = 2 mmol/l となり，いずれも「無害でない」と判定された。

2.3 JIS モルタルバー法による ASR 反応性の検討

次に，JIS モルタルバー法により骨材の ASR 反応性を判定した。セメントには普通ポルトランドセメント（OPC）（密度 3.16g/cm^3，比表面積 3380cm^2/g，強熱減量 2.23%）を，骨材には 2.5mm～150 μ m に粒度調整を行った反応性骨材を使用し，40×40×160 mm のモルタル供試体を作製した。セメントの全アルカリが Na_2O_{eq} で 1.2 mass% となるよう NaOH 水溶液で調節した。成型後 1 日で脱型し，40℃で養生を行った。長さ測定は JIS A 1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法－第 3 部：ダイヤルゲージ法」に準拠した。

図-2 にその結果を示す。骨材 A は養生初期より急激な膨張傾向が見られたものの，促進 2 週を過ぎると緩やかな膨張速度となり，8 週で膨張はほぼ終局を迎え，26 週での膨張率は 0.063%であった。一方，骨材 B は促進 8 週までは緩やかに膨張し，それ以降急速に膨張が進み，26 週での膨張率は 0.107%となった。JIS モルタルバーの判定基準によると，骨材 A は「無害」，骨材 B は「無害でない」と判定された。

2.4 促進モルタルバー法（ASTM C 1260）による ASR 反応性の検討

次に，ASTM C 1260 により骨材の反応性を判定した。セメントには OPC を，骨材には 2.5mm～150 μ m粒度調整を行った反応性骨材を使用し，25×25×285 mm のモルタル供試体を作製した。成形後，80℃の水中で 1 日養生を行い，その後 80℃の 1 規定 NaOH 水溶液中で 14 日間の加速養生を行い，長さ変化を測定した。

図-3 にその結果を示す。骨材 A は初期より急速な膨張を見せ，14 日促進での膨張率は 0.500%となった。一方，骨材 B はわずかに膨張傾向を示すものの，急速な膨張を起こさず 14 日促進での膨張率は 0.035%にとどまった。ASTM C 1260 の判定基準によると，骨材 A は「潜在的有害」，骨材 B は「無害」と判定された。しかし，チャートである骨材 B は，厳しいアルカリ環境によるカルセドニーの溶脱や粒度調整による粒形ペシマムの効果があった可能性が考えられたため，粒形の大きな骨材を用いた ASR 反応性試験も行った。

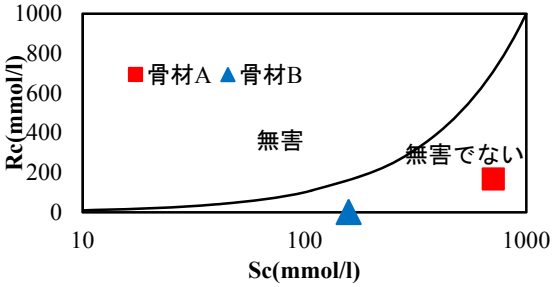

図-1　化学法の結果

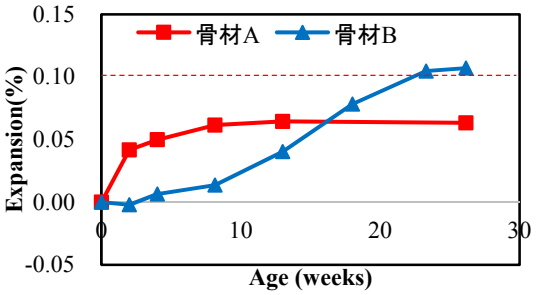

図-2　JIS モルタルバー法の結果

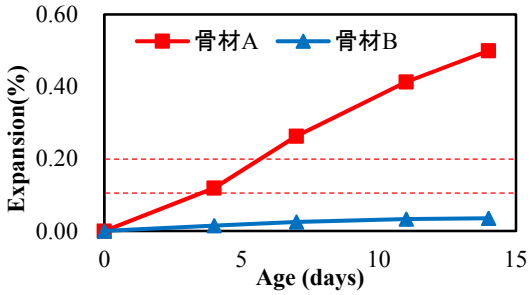

図-3　ASTM C 1260 モルタルバー法の結果

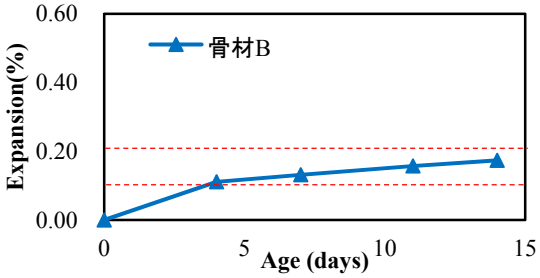

図-4　RILEM AAR-5 法の結果

2.5 RILEM AAR-5 による ASR 反応性の検討

骨材 B について，RILEM AAR-5 “Rapid Preliminary Screening Test for Carbonate Aggregate”による ASR 膨張促進試験を行った。セメントには OPC，骨材には 8mm～4mm に粒度の調節した骨材 B を使用し，供試体サイズは 40×40×160mm の角柱供試体を作製した。成形後，80℃の水中で 1 日養生を行い，その後 80℃の 1 規定 NaOH 水溶液中で 14 日間の加速養生を行い，長さ変化を測定した。

図-4 にその結果を示す。初期に急速な膨張が見られた

表-2　骨材の物理的性質

骨材	表乾密度 (g/cm³)	絶乾密度 (g/cm³)	吸水率 (%)
A	2.54	2.5	1.50
B	2.60	2.57	1.07
C（粗）	2.70	2.70	0.31
C（細）	2.65	-	-

表-3　示方配合

反応性骨材種類	W/C	細骨材率 s/a	単位量 (kg/m³)					
			水	セメント	細骨材	粗骨材		
						A	B	C
A	50	45	163	326	794	296	-	734
B	50	45	160	320	827	-	992	-

表-4　要因と配合名

反応性骨材	養生温度 (℃)	アルカリ総量 (kg/m³)	FA (%)	配合名
A	60	5.50	-	No.1-1
		4.25	-	No.1-2
		3.00	-	No.1-3
		2.50	-	No.1-4
		2.00	-	No.1-5
A	40	5.50	-	No.2-1
		4.25	-	No.2-2
		3.00	-	No.2-3
A	20	5.50	-	No.3-1
		4.25	-	No.3-2
		3.00	-	No.3-3
		2.50	-	No.3-4
A	60	5.50	15	No.4-1
		5.60	30	No.4-2
B	60	5.50	-	No.5-1
		4.75	-	No.5-2
		4.00	-	No.5-3
		3.00	-	No.5-4
B	40	5.50	-	No.6-1
		4.75	-	No.6-2
		4.00	-	No.6-3
B	20	5.50	-	No.7-1

が，その後膨張傾向は緩やかとなり，14 日促進での膨張率が 0.173%となり「不明確」と判定された。

3. コンクリートプリズムを用いた加速試験

2.において，ASR 反応性を検討した骨材 A,B を用いてコンクリートプリズムを用いた ASR 促進膨張試験（以下，CPT）を行った。

3.1 配合および試験要因

表-2 に使用した骨材の物理的性質，**表-3** に基本となる示方配合，さらに**表-4** に試験要因と配合名を示す。

まず，ASR 反応性骨材は粗骨材として用いた。A 骨材は既往の研究から，ASR 非反応性骨材である C 骨材とともに，A 骨材：C 骨材＝30：70（体積比）の割合で用いることによりペシマム現象を起こすことが分かっている。今回，A 骨材は全てそのペシマム配合で用いた。次に B 骨材は粗骨材として 100%用いた。細骨材は全ての要因で C 骨材を 100%用いた。結合材には OPC に加えフライアッシュⅡ種（FA）（密度 2.31g/cm³, 比表面積 4170cm²/g, 強熱減量 1.5%）を使用した。

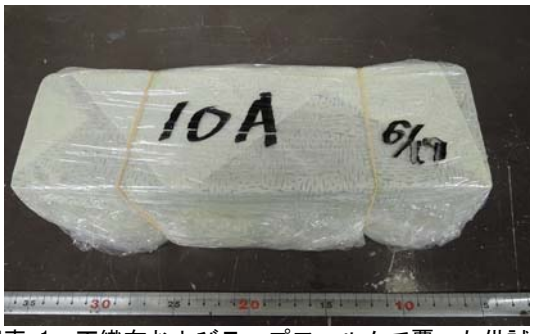

写真-1　不織布およびラップフィルムで覆った供試体

写真-2　ステンレス容器

養生温度による膨張傾向の違いを検討するため，60±2℃，40±2℃および 20±2℃の 3 通りの温度で養生を行った。さらにそれぞれの養生温度でアルカリ総量による膨張傾向の違いを検討した。

配合名は A 骨材の 60℃養生をアルカリ総量別に No.1-1～No.1-5 とした。同様に A 骨材の 40℃養生を No.2-1～No.2-3，A 骨材の 20℃養生を No.3-1～No.3-4 とした。A 骨材の配合に FA を質量比で 15%混和した水準を No.4-1，FA を質量比で 30%混和した水準を No4-2 とした。さらに B 骨材の 60℃養生を No.5，B 骨材の 40℃養生を No.6，B 骨材の 20℃養生を No.7 とした。

3.2 供試体寸法および養生方法

本研究では，コンクリートプリズムを用いた ASR 促進膨張試験法として，RILEM AAR-4 “Detection of potential alkali-reactivity - Accelerated method for testing aggregate combinations using concrete prisms”による方法を基準とし，養生方法に工夫を加えた試験法（以下，修正 AAR-4 法）を用いた。

供試体は，75×75×250 mm の角柱供試体を 3 本 1 組

で作製し，それぞれの両端にステンレス製のゲージプラグを埋め込んだ。打設の際，目的となるアルカリ総量となるように NaOH 水溶液を用いて調節し，打設後 24 時間温度を 20±2℃に保った恒温室で養生を行い，その後脱型を行った。脱型後，20±2℃の水中に供試体を浸漬し，30±5 分間吸水させた後，供試体長さを測定し，基長とした。養生する際は，乾燥およびアルカリ溶脱の防止を目的として，供試体を不織布で覆い，さらにラップフィルムにより密閉して，底部に水を張った密閉できるステンレス製もしくはプラスチック製の格納容器に立てて格納した。供試体およびステンレス製の養生容器を**写真-1** および**写真-2** に示す。不織布にはあらかじめ 50g のアルカリ水溶液を吸水させた。アルカリ水溶液の濃度は，細孔溶液中のアルカリ濃度と同様となるよう，NaOH 水溶液を用いて調節した。

養生は目的とした養生温度となる恒温槽（室内）にて行った。測定は促進期間 2，5，10，15，20，26 週で格納容器を養生槽から取り出し，20℃に保った室内で 24 時間冷却した後，JIS A 1129-3「モルタル及びコンクリートの長さ変化測定方法-第三部：ダイヤルゲージ法」と RILEM AAR-4 に従い，供試体長さを測定した。また，1 回の測定後も不織布は継続して使用し，給水量が 50g になるよう水道水を用いて調節を行った。

3.3 試験結果および考察

図-5，**図-6** にそれぞれ骨材 A と骨材 B の修正 AAR-4 法の試験結果を示す。No.1-1 および No.1-2 は 15 週促進までのデータを，それ以外の水準は 26 週促進までのデータを示す。No.5-1，No.6-1 および No.7-1 は 26 週促進までのデータを，それ以外の水準については 20 週促進までのデータを示す。**図-7** に 15 週におけるアルカリ総量と膨張率の関係を示す。

まず，安山岩である骨材 A の挙動を考える。まず，No.1-1 から No.1-5 を比較すると，60℃養生においてはアルカリ総量が増加するにつれ，早期から大きな膨張率を示し，膨張速度も高い結果となった。続いて，No.2-1，No.2-2 および No.2-3 を比較すると，40℃養生では，試験範囲の 3.00～5.50 kg/m^3 の範囲では，材齢初期から同様な膨張速度を示しており，26 週における膨張率も近い値で，アルカリ総量への依存が比較的小さいことが分かる。20℃養生においてはアルカリ総量ごとに膨張開始時期が異なるなど，他の温度とは異なる挙動を示した。ただし，No.3-1，No.3-2 および No.3-3 を比較すると，20 週以降では 3.00kg/m^3 を上回るアルカリ総量において，膨張率はアルカリ総量に依存しないことが分かる。

次に，No.1，No.2 および No.3 を比較して，ASR 膨張の養生温度依存性を考える。60℃養生では初期に短期間で大きく膨張が進み，すぐに膨張は緩やかになる。26 週

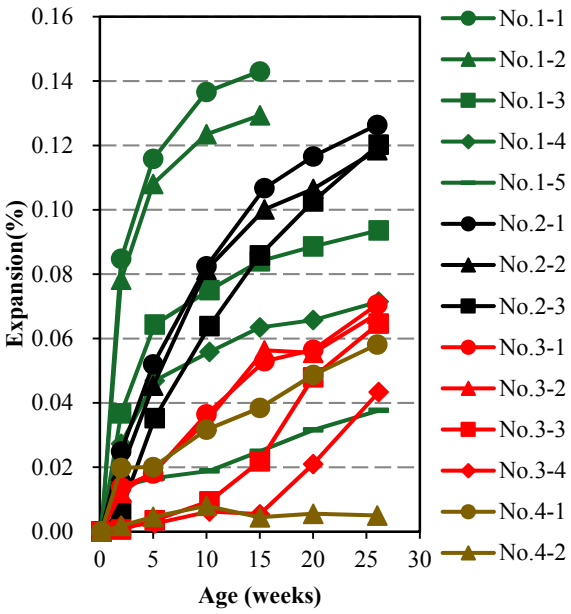

図-5　骨材 A の修正 AAR-4 法の結果

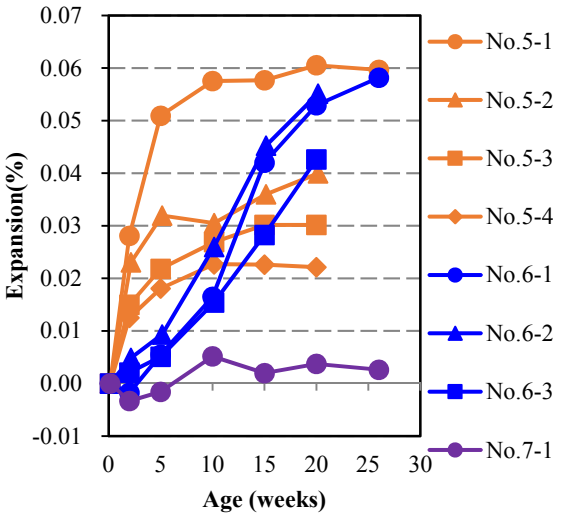

図-6　骨材 B の修正 AAR-4 法の結果

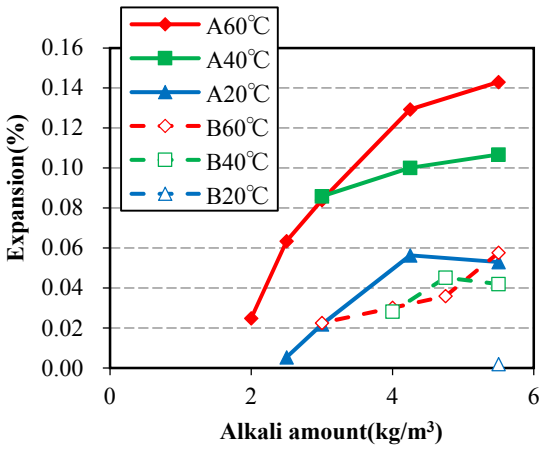

図-7　アルカリ総量と膨張率（材齢 15 週）

促進後も膨張を続けているものの，促進期間が長期になるにその膨張速度が低くなっていることが分かる。これはとくにアルカリ総量が多い場合に顕著である。それに対し，40℃養生では初期の膨張の傾きは60℃より小さいものの，60℃よりも長く，高い膨張速度が継続していることが分かる。20℃養生ではさらに初期の膨張の傾きが小さい。しかし，60℃および40℃養生では10週もしくは15週促進から膨張速度が低くなっており，それに比べ20℃養生は15週，20週から徐々に膨張速度が高くなっていることが分かる。また，No.1-3とNo.2-3の膨張率を比較すると，15週促進の時点でNo.2-3の方が上回っており，同様のアルカリ総量でも養生温度によっては終局膨張率に差が出ることが分かった。このことは，異なる養生温度において生成されるASRゲルの組成や粘度に違いが生じることが原因の可能性としてあげることができる。よって，異なる養生温度で促進試験を行い，ある膨張率でのASRゲルを分析し比較を行う必要がある。

また，No1-1，No.4-1およびNo.4-2を比較すると，FAの混和率を増加させることによるASR抑制効果の増加も認められる。修正AAR-4により混和材の抑制効果を判定するとすれば，骨材Aをペシマム配合で用いる場合にはFAは15%では不足で30%が必要と判断される。今後さらに混和材の混和率を要因とした試験体を作製し，ASR抑制の適切な評価のためのデータの蓄積が必要である。

次にチャートである骨材Bの挙動を考える。まず，No.5-1からNo.5-4までの膨張傾向を比較すると，骨材Aと同様に60℃養生においては初期から高い膨張速度を示し，アルカリ総量に比例して高い膨張率を示すことが分かる。続いて40℃養生におけるNo.6-1，No.6-2およびNo.6-3の膨張傾向を比較すると，骨材Aと同様にアルカリ総量への依存性が小さいことが分かる。20℃養生では試験期間の間に膨張は認められなかった。

次に，No.5，No.6およびNo.7を比較して，ASR膨張の養生温度依存性を考える。60℃養生では初期に高い膨張速度を示す点は骨材Aと同様である。しかしながら，骨材Aと異なり20週促進で膨張が概ね収束している。40℃養生では促進初期には低い膨張速度だったが，促進5週より大きく膨張し，促進20週では膨張は収束傾向に変化した。No.6-2，No.6-3は20週促進ですでに60℃養生であるNo.5-2およびNo.5-3の膨張率を超えており，No.6-1も26週促進でNo.5-1とほぼ同等の膨張率となっている。よって骨材Aと同様に養生温度によってASRゲルの組成や生成速度に差が出て，終局膨張率も異なるということが考えられる。No.7-1は26週促進では依然膨張傾向を示していないが，40℃の場合と同様にある時点から急激に膨張を開始する可能性も否定できず，継続した計測を行う予定である。

次に，図-7に示すように15週促進におけるアルカリ総量と膨張率の関係をそれぞれの養生温度で比較する。これまでの考察のとおり，60℃養生における膨張傾向がもっともアルカリ総量に依存することが見て取れる。また，40℃養生および20℃養生における膨張傾向はアルカリ総量が大きな範囲ではあまりアルカリ総量に依存しないことが分かる。

アルカリ総量への依存性が異なる原因の一つとして，養生温度が高い場合，高いエネルギーで初期のASRゲルを生成することができ，多くのアルカリを消費できるのに対し，養生温度が低くなると短期間に消費するアルカリに限界があり，高アルカリの水準においては膨張挙動が頭打ちになるためではないかと考えられる。また，ASRゲルの生成するひび割れ組織自体が異なる可能性もある。そうであるならば，さらに長期に渡って促進を続けた場合，40℃養生の水準の中でもアルカリ量に余裕がある水準と余裕がない水準でアルカリ総量依存性が現れるのではないかと考えられる。今後，詳細な組織観察が必要である。これらをふまえ今後は40℃養生および20℃養生においてアルカリ総量の低い水準の加速促進試験を行い，膨張挙動の養生温度とアルカリ総量への依存性をさらに検討していきたい。

また本研究の結果から，養生温度を60℃で加速試験を行うことにより，今回用いたB骨材である隠微晶質石英からなりカルセドニーを含むチャートについては10週もしくは15週といった早期判定が可能であることが分かった。しかしながら，骨材Aのようなクリストバライトを多量に含む安山岩は60℃養生であってもなかなか膨張が終息せず，危険域まで膨張するかどうかの判断には時間がかかるかもしれないことも予想される。60℃におけるCPTは骨材の反応性の早期判定という観点では有効であるが，終局膨張率を推定する点では課題を残している。いずれにせよ，岩石学的観察をもって，反応した鉱物の特定とひび割れとASRゲルの分布を知ることが重要である。

4. アルカリ溶脱の検討

4.1 実験概要

養生温度を変えた検討はすでに多くの報告がある[5]。60℃で養生するRILEM AAR-4は早期に膨張するが，38℃で養生するRILEM AAR-3に比較し，終局膨張量は少ないことが指摘されている。この原因として，AAR-3ではアルカリ溶脱がほとんどないのに比較し，AAR-4では数10%と著しいアルカリ溶脱を示すことが一因と考えられていた。

以前の研究で行った，不織布で覆わないRILEM AAR-4

表-5　溶脱確認に用いた水準のアルカリ総量

RILEM AAR-4 法		修正 RILEM AAR-4 法	
要因番号	アルカリ総量 (kg/m³)	要因番号	アルカリ総量 (kg/m³)
1	1.90	13	3.00
2	2.50	14	2.50
3	2.40	15	2.00
4	3.00	16	5.50
5	3.60	17	4.25
6	2.40	18	3.00
7	3.00	19	5.50
8	3.60	20	4.25
9	2.40	21	3.00
10	3.00	22	2.50
11	3.60	23	5.50
12	3.60	24	5.60

法では供試体表面からのアルカリ溶脱が問題となった[6]。そこで，3. で行った修正 AAR-4 法と RILEM AAR-4 法でのアルカリ溶脱の比較を行った。

26 週促進の後，ステンレス容器もしくはプラスチック容器底部より溶液を採取し，0.01mol/l HCl 水溶液を用いて中和滴定を行った。底部の溶液中のアルカリ濃度を求め，打設時におけるアルカリ総量に対し質量%でどれだけ底部に溶脱したかを計算により求めた。**表-5** に溶脱の確認に用いた要因の打設時におけるアルカリ総量を示す。

4.2 試験結果

図-8 に試験結果を示す。RILEM AAR-4 法では，溶脱の大きい要因や小さい要因など様々であるのに対し，修正 RILEM AAR-4 法では全ての要因で溶脱率は小さくなった。しかし，多少のアルカリ溶脱がみられる。これは不織布の上に巻くラップフィルムでの密閉が十分ではないことが原因の一つとして考えられ，今後は袋状の包装など，しっかりと密閉を行える工夫を考えなければならない。また，不織布と供試体間でのアルカリの移動についての検討も必要である。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) 養生温度が 60℃の場合，今回用いた安山岩 A とチャート B はいずれもアルカリ総量に膨張挙動は強く依存した。一方，養生温度が 40℃および 20℃のように低い場合，アルカリ総量依存が見られないアルカリ総量範囲が存在した。

(2) 修正 AAR-4 法によって，FA による ASR 抑制効果の評価が可能であると考えられる。

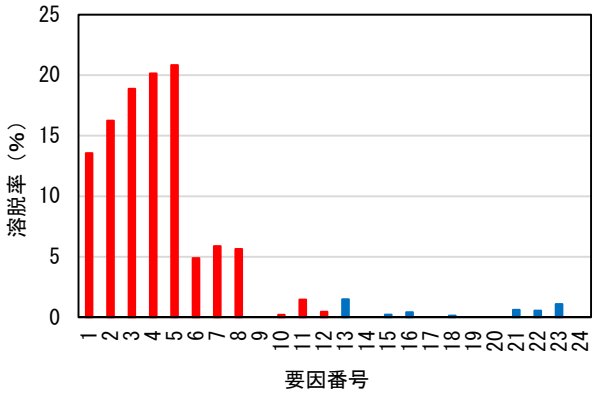

図-8　溶脱率

(3) 不織布およびラップフィルムによる包装によって，アルカリ溶脱が抑えられることが分かった。

(4) CPT によりコンクリートの膨張挙動を評価することはできたが，温度とアルカリ総量の及ぼす影響は骨材ごとに異なり，二つの因子は独立ではなく交互作用を有していた。組織観察を行うなどして，この原因を解析することが，CPT による ASR 膨張の定量的予測に関しては重要である。

参考文献

1) 鳥居和之：アルカリシリカ反応にいかに対応するか，セメント・コンクリート，No.696，pp.1-9，2005.2

2) 佐川康貴，山田一夫，烏田慎也，小川彰一：コンクリートプリズムを用いた 60℃加速養生によるアルカリシリカ反応性の評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol36，No.1，pp.1120-1125，2014

3) 社団法人　日本コンクリート工学協会：作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会　報告書，pp.111-114，2008

4) 社団法人：ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書，No.696，pp.264-265，2014.7

5) Larive, C.: Apports Combinés de l'Experimentation et de la Modelisation à la Comprehension de l'Alcali Reaction et de ses Effects Mecaniques, Laboratoire Central des Ponts et Chausses (1998) (in French)

6) 山田一夫，川端雄一郎，小川彰一，丸山一平：原子力施設におけるアルカリ骨材反応の一考察，セメント・コンクリート論文集，Vol.68，pp.457-464，2015