

論文 ASR によるコンクリートの内部ひび割れの形成・進展過程の偏光顕微鏡観察

宮野 暢紘^{*1}・鳥居 和之^{*2}

要旨: 本研究は, ASR によるコンクリートの内部ひび割れの形成・進展過程を調べるため, 反応性骨材(安山岩砕石, 川砂利)や養生条件(湿気槽, 飽和 NaCl 浸漬)の異なるコンクリートの膨張量と内部ひび割れの観察結果との関係について検討を行った。また, 内部ひび割れや骨材界面に存在する ASR ゲルの化学組成を EPMA にて調べることで, ASR ゲルの化学組成がコンクリートの膨張性状に及ぼす影響についても検討した。その結果, コンクリートの膨張量と偏光顕微鏡による ASR 劣化度は概ね対応し, また, フライアッシュの有無に関係なく安山岩粒子内の ASR ゲルの化学組成はほぼ同一であり, 吸水膨張性を有するものと判定された。

キーワード: ASR, 促進膨張試験, フライアッシュ, ポゾラン反応, 偏光顕微鏡観察

1. はじめに

アルカリシリカ反応(ASR)は, 高いアルカリ性をもつ細孔溶液と接した骨材中のシリカ鉱物やガラス相が溶解し, 骨材の周囲またはその内部に生成したASRゲルが吸水・膨張する過程で, コンクリートにひび割れが発生する現象である¹⁾。このようにASRによる劣化過程は, ひび割れの生成に特徴づけられるが, それらはコンクリートの表面で観察される巨視的なひび割れとコンクリートの内部で発生する微視的なひび割れに分類できる。前者は, コンクリート中の鉄筋による拘束や表面と内部との乾燥状態の相違などを反映し, パターン化された, 幅の大きなひび割れであるのに対して, 後者は顕微鏡レベルでのみ観察できる, 反応性骨材から発達した 10~20 μm 程度の微細なひび割れである²⁾。Katayama³⁾は, ASR劣化コンクリートから作製したコンクリート薄片の偏光顕微鏡観察によって, 反応性骨材の周囲の微細ひび割れの形成・進展の過程を分類し, コンクリートのASR劣化度を評価している。また, 山戸ら⁴⁾, 小村ら⁵⁾は, モルタル薄片の偏光顕微鏡によるひび割れの観察結果よりASR劣化度を判定し, それらの判定結果がモルタルの膨張量と密接に関係していることを明らかにしている。かねてより, 諸外国では, コンクリート薄片の偏光顕微鏡観察によりコンクリートの劣化現象を判定する診断技術が普及してきているが, わが国では熟練した技術者が少なく, この分野の研究が大きく遅れているのが実状である。

そこで本研究では, ASR によるコンクリートの内部ひび割れの形成・進展過程を調べるために, 反応性骨材や養生条件の相違する各種コンクリートより薄片試料を作製し, コンクリートの膨張量と内部ひび割れの観察結果との関係について検討した。さらに, コンクリートの

ひび割れや骨材界面に存在する ASR ゲルの化学組成を EPMA により調べることににより, ASR ゲルの化学組成やその結晶度がコンクリートの膨張性状に及ぼす影響についても検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント(OPC, 密度: 3.14 g/cm³, ブレーン粉末度: 3290 cm²/g, 全アルカリ量: 0.47%)を使用した。また, フライアッシュによるASR抑制効果を検討するため, 品質の異なるフライアッシュを, JIS規格 I 種品(以下, FA1), JIS規格 II 種品(以下, FA2L), および, 活性度指数がJIS規格 II 種の下限值内となるものの, 通常出荷時はJIS規格IV種に相当する原粉(以下, FA4)の3種類を用いた。ASR抑制効果を期待するフライアッシュの置換率は, JIS A 5308(付属書 2)より 15%以上とされており, また低品位フライアッシュのASR抑制効果については, JIS規格 III 種品および規格外であってもセメント内割り置換 30%でASR抑制効果が発揮されたと報告されている⁶⁾。本研究では, 厳しい環境下においても品質に応じて十分な効果が見込める置換率を把握するために, FA1 の置換率を高活性度によるASR抑制効果に期待し 10%, FA2Lの置換率は, 確実にASRを抑制するよう 20%とした。また, FA4 の置換率は, 活性度の低さを置換量によって補うこととし, 30%とした。フライアッシュの物理的性質および化学成分を表-1 に示す。コンクリートの配合は水結合材比を 45%, 細骨材率を 44%, 粗骨材容積比を 36%と一定にした。コンクリート中のアルカリ量は通常 3kg/m³以下であるが, 飛来塩分や凍結防止剤など外部環境からのアルカリの供給(NaCl)や骨材自身のアルカリ溶出などを想定し, 本研究では等価

*1 住友大阪セメント(株) 北陸支店 工修 (正会員)

*2 金沢大学 理工研究域 環境デザイン学系 教授 工博 (正会員)

表-1 フライアッシュの物理的性質および化学成分

| 種類 | FA1 | FA2L | FA4 |
|-----------------------------|----------|-----------|-----------|
| | (JIS I種) | (JIS II種) | (JIS II種) |
| SiO ₂ (%) | 60.4 | 61.0 | 49.6 |
| 湿分(%) | 0.15 | 0.04 | 0.10 |
| 強熱減量(%) | 2.50 | 2.20 | 2.10 |
| 密度(g/cm ³) | 2.40 | 2.31 | 2.23 |
| ブレン比表面積(cm ² /g) | 5300 | 3710 | 3320 |
| フロー値比(%) | 109 | 104 | 106 |
| 活性度 28days | 90 | 93 | 80 |
| 指数(%) 91days | 103 | 101 | 90 |

表-2 コンクリートの示方配合

| 混和材 (FA) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | | |
|----------|--------------------------|-----|-----|-----|------|-------|-------|
| | W | C | FA | S | G | Ad1* | Ad2* |
| 無混和 | 160 | 356 | - | 765 | 1016 | 0.856 | 0.712 |
| FA1 | | 320 | 36 | 756 | | | |
| FA2L | | 285 | 71 | 744 | | | |
| FA4 | | 249 | 107 | 727 | | | |

*Ad1：高性能減水剤 Ad2：AE剤

アルカリ量(Na₂O等量)を6kg/m³、8kg/m³と設定した。なお、アルカリ量はセメントと調整用に添加するNaClの総和とした。コンクリートの代表的な配合を表-2に示す。

使用骨材は、非反応性の川砂(石川県手取川産)と安山岩砕石(北海道産)および川砂利(富山県常願寺川産)の2種類である。反応性骨材の化学法(JIS A1145)およびモルタルバー法(JIS A1146)の結果と偏光顕微鏡観察により同定された反応性骨材に含有される反応性鉱物の種類を表-3に示す。安山岩砕石は反応性鉱物としてクリストバライトと少量のトリディマイトを含有しており、わが国で産出する安山岩砕石の中でもアルカリシリカ反応性が高いものであった。一方、川砂利は反応性岩種として安山岩、流紋岩および溶結凝灰岩の粒子を30%~40%含有し、これらの中でとくに反応性が高い安山岩の混入率はベシマム混入率にほぼ近いものと考えられた⁷⁾。川砂利中の安山岩粒子はクリストバライトとオパールを含有していた。これらの2種類の反応性骨材はいずれもわが国の火山岩起源の反応性骨材を代表するものであり、骨材の反応性鉱物とその含有形態が相違するのが特徴であると言える。

2.2 試験方法

(1) コンクリート試験体による膨張挙動の検討

コンクリート試験体は、直径10cm、高さ20cmの円柱とし、中央部に取り付けられたステンレスバンド(基準長：100mm)の長さ変化をコンタクトゲージにより測定した。コンクリート試験体は、蒸気養生(前置き1時間、最高温度50℃・4時間)を実施し、翌日脱型後、14日材齢まで

表-3 反応性骨材の岩石学的特徴

| 骨材 | 鉱物組成 | 化学法 | モルタルバー法 |
|------------------|-----------------------|-------|---------|
| 安山岩砕石 | 長石、石英、クリストバライト | 無害でない | 無害でない |
| 川砂利 (安山岩粒子含有) | 長石、石英、クリストバライト、雲母、角閃岩 | 無害でない | 無害でない |

表-4 ASR劣化度の評価基準³⁾

| ステージ | 劣化状況 |
|-------------------|-------------------------------|
| I (traceable) | 反応リムの形成と反応性骨材粒子からのASRゲル・ゾルの析出 |
| II (minor) | 反応性骨材粒子からひび割れの発達 |
| III (moderate) | 反応性骨材粒子からセメントペーストへひび割れの進展 |
| IV (severe) | 連続的なひび割れ網の形成とASRゲルの気泡への進入 |

20℃の室内にて密封養生した。それ以後、湿気槽養生(温度40℃、湿度100%)または飽和NaCl溶液浸せき養生(温度50℃)を約1.5年間にわたり継続した。

(2) 偏光顕微鏡によるコンクリートのひび割れおよびASRゲルの生成状況の観察

コンクリートのASRによる劣化現象は、コンクリート内部の微細なひび割れの形成とその発達に関連づけて考察することができる。このため、コンクリートの膨張試験の終了後(約1.5年間)にコンクリート試験体の中心部から50mm×50mmの断片(厚さ5mm)を切り出し、それから薄片(20mm×25mm、厚さ20μm)を2枚ずつ作製し、偏光顕微鏡(ニコン社ECLIPSE LV100POL)によりコンクリートの内部組織を観察した。コンクリート試験体の観察範囲を網羅するために、薄片の1枚は10mmから15mm程度の粗骨材粒子を含むものとし、主に骨材界面の反応痕跡や骨材からのひび割れの進展の観察に供した。また、もう1枚の薄片はモルタル中での連続的なひび割れ網の発達状況の観察に供した。本研究で採用した偏光顕微鏡によるコンクリート薄片のASR劣化度の評価基準を表-4に示す³⁾。

(3) EPMAによるひび割れや気泡中に生成したASRゲルの化学組成の分析

EPMA(日本電子社JXA-8200、波長分散型X線分析装置付き電子顕微鏡)により、骨材粒子の内外のひび割れや気泡中に滞留したASRゲルの生成状況とその化学組成を調べた。Katayamaら⁸⁾の研究によると、骨材粒子内部のアルカリ(Na(K))に富んだASRゲルにセメントペースト中からのカルシウム(Ca)が拡散する過程でASRゲルの吸水・膨張性が低下することが知られている。このため、ASRゲルの形態とその化学組成(Ca/Si比とCa/(Na+K)比)に着目して、コンクリートの表面ひび割れや膨張性状との関係について検討した。

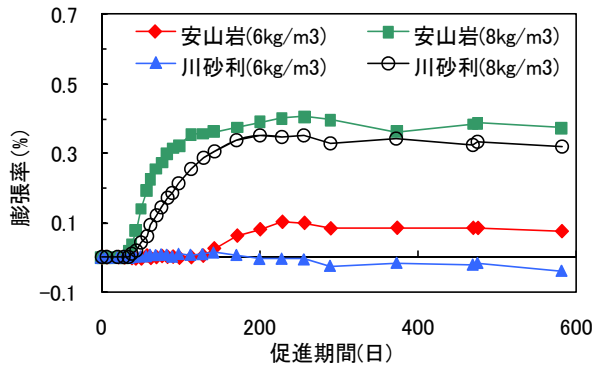


図-1 コンクリートの膨張挙動 (FA 無混和)

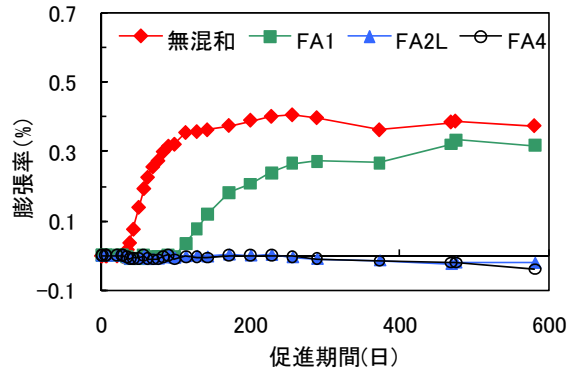


図-2 コンクリートの膨張挙動 (安山岩碎石)

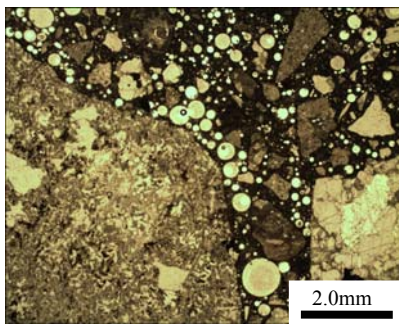


写真-1 川砂利 (6kg/m³)

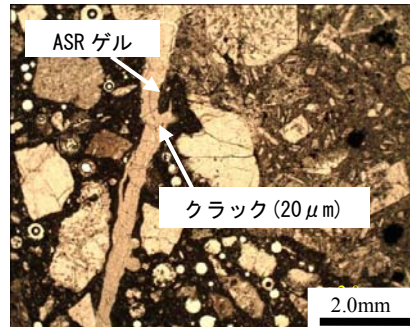


写真-2 安山岩 (8kg/m³)

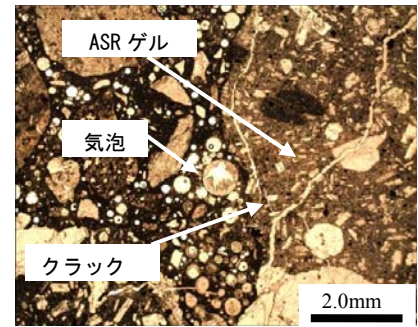


写真-3 川砂利 (8kg/m³)

3. コンクリートの膨張挙動と微視的ひび割れの観察

3.1 反応性骨材の種類がコンクリートの膨張挙動に及ぼす影響

2種類の反応性骨材(安山岩碎石, 川砂利)を使用したコンクリート(湿気槽養生, アルカリ添加量: 6kg/m³および8kg/m³)の膨張挙動を図-1に示す。安山岩碎石はアルカリ添加量(NaCl)が6kg/m³の条件にて0.1%の膨張が発生したが, 川砂利は膨張が確認されなかった。一方, アルカリ添加量が8kg/m³に増加すると, いずれの反応性骨材も材齢1カ月より膨張が発生するが, 材齢3カ月以降はおおむね一定の値を示した。これは, アルカリが内在塩分としてのNaClに限定されていることや, さらに湿気槽養生中に試験体からアルカリが漏出することによるものと考えられる。

2種類の反応性骨材を使用したコンクリートの偏光顕微鏡による観察結果を写真-1~写真-3に示す。反応性骨材を使用したコンクリートの膨張率は, 川砂利<安山岩碎石の順番で増大したが, コンクリート薄片の観察結果から得られたASR劣化度(ASRゲルの生成量やひび割れの密度)は, コンクリートの膨張率とよく一致していた。すなわち, 膨張が発生していない川砂利を使用したコンクリート(アルカリ添加量: 6kg/m³)では骨材粒子の周囲にわずかな反応の痕跡(環)が認められるが, 骨材から発達したひび割れは観察されなかった(写真-1参照)。それに対して, 安山岩碎石を使用したコンクリートは粒径が5mmから10mmの骨材の内部やその界面に幅20μm程度

のひび割れが多数発生しており, それらのひび割れはセメントペースト相の細骨材の粒子間に連続的に進展していた(写真-2参照)。また, 10mm以上の大きな粒径のものには反応の痕跡がまったく認められず, 安山岩碎石の反応は骨材粒径とも密接に関係しているものと推察された。これは, 試験体のアルカリ量は主に内在するNaClからの供給に限定されるため, 骨材粒径のペシマム現象に関係するものと推察された。一方, 川砂利を使用したコンクリートでは安山岩粒子からのみ微細なひび割れが発達していたが, ひび割れの密度は安山岩碎石よりも軽微であった(写真-3参照)。また, 川砂利中の流紋岩や凝灰岩の粒子はわずかな反応の痕跡(環)が観察される程度であり, ASRへの寄与はほとんど認められなかった。また, 安山岩碎石および川砂利ではクリストバライトが主に反応していることが観察された。すなわち, NaCl添加によって作り出されたアルカリ雰囲気の下では, 反応性が高いクリストバライトやオパールに比べて火山ガラスの反応は抑制されているようであった⁹⁾。

以上の観察結果より, 2種類の反応性骨材を使用したコンクリートの膨張挙動は, それぞれの反応性骨材に含まれる反応性鉱物の種類およびその量とそれらの反応状況の相違によって説明することができた。

3.2 フライアッシュがコンクリートの膨張挙動に及ぼす影響

フライアッシュを混合したコンクリート(湿気槽養生, 安山岩碎石, アルカリ添加量: 8kg/m³)の膨張挙動を

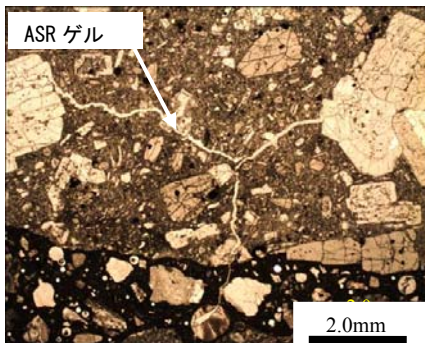


写真-4 安山岩(8kg/m³, FA1)

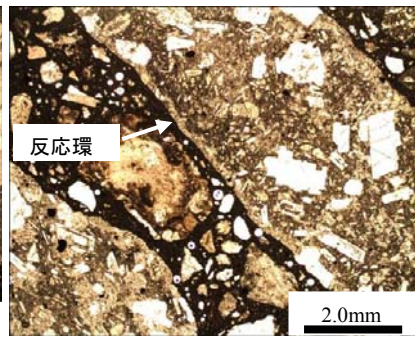


写真-5 安山岩(8kg/m³, FA2L)

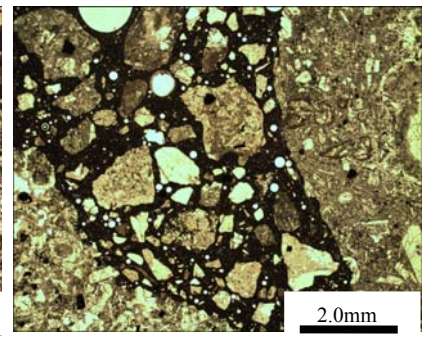


写真-6 安山岩(8kg/m³, FA4)

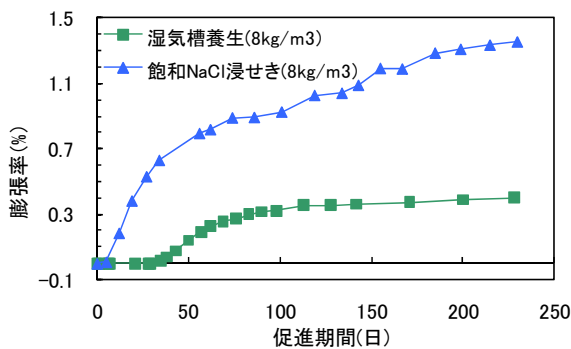


図-3 コンクリートの膨張挙動 (FA 無混和)

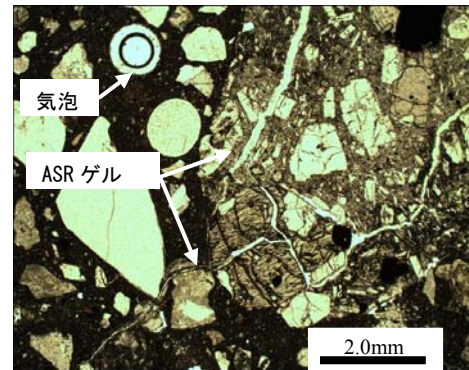


写真-7 安山岩(8kg/m³) 【飽和NaCl溶液浸せき】

図-2に示す。無混和のコンクリートと比較して、フライアッシュを混和したコンクリートはいずれもASRによる膨張が大きく抑制されているが、フライアッシュの種類やその置換率によっては長期材齢にて比較的大きな膨張が発生し、ASR抑制効果が十分に発揮されないものもあった。すなわち、FA1(10%置換)のものは初期材齢にてASRが抑制されたが、材齢とともに膨張が進行し、材齢450日にて0.3%の膨張率になった。フライアッシュを混和することにより十分なASR抑制効果を期待するためには、フライアッシュのポズラン反応過程で生成する低C/S比のCSHがアルカリイオン(Na⁺およびK⁺)を吸着することにより、細孔溶液のOH⁻イオン濃度をそれぞれの反応性骨材がASRを発生する閾値以下(安山岩では0.3N程度)にまで下げてやる必要がある¹⁰⁾。FA1(10%置換)は、無混和のものと比較して遅れて膨張が発生したことから、アルカリ添加量(NaCl):8kg/m³の条件下においてフライアッシュ置換率10%は上記の条件が満足されていないことを示唆している。

フライアッシュを混合したコンクリートの偏光顕微鏡による観察結果を写真-4~写真-6に示す。FA1(10%置換)のものは、無混和のものと同様に安山岩碎石にASRが発生しているのが観察された(写真-4参照)。しかし、FA1(10%置換)のものひび割れ幅や密度は、無混和のものと比較して減少しており、ASR劣化の進行が緩和されている。また、FA2(20%置換)のものは、安山岩粒子の周囲に反応の痕跡(環)がわずかに観察されるが、安山岩粒

子の反応は完全に抑制されており、骨材粒子の周囲にASRによるひび割れは観察されなかった(写真-5参照)。同様に、FA(30%置換)のものは、ASRによるひび割れは観察されなかった(写真-6参照)。

以上より、アルカリ添加量(NaCl:8kg/m³)の条件下にて、フライアッシュの品質規格(JIS A1201)に関係なく20%以上の置換率であればASRを確実に抑制することができ、低品質の原粉でも骨材の反応性に応じた、適切な置換率を選定することによりASR抑制効果が期待できることが明らかになった。

3.3 養生条件がコンクリートの膨張挙動に及ぼす影響

安山岩碎石を使用したコンクリートを湿気槽養生(温度40℃、湿度100%)したものと、飽和NaCl溶液浸せき養生(温度50℃)したものの膨張挙動の比較を図-3に示す。湿気槽養生と比較して、飽和NaCl溶液浸せき養生したコンクリートは膨張が速く、またその膨張量も約4倍と大きい値を示した。飽和NaCl溶液浸せき養生したものは、十分なアルカリが外部から供給され、このような大きな膨張を示したものと考えられる。

飽和NaCl溶液浸せき養生したコンクリートの偏光顕微鏡による観察結果を写真-7に示す。コンクリートの膨張率は、飽和NaCl溶液浸せき養生したものの方が非常に大きかったが、コンクリート薄片の観察結果から得られたASR劣化度は同程度であった(写真-2,7参照)。ある程度のコンクリートの膨張率(0.4%以上)が発生した場合には、その劣化度の相違は比較的小さいと考えられる。

4. コンクリートの ASR 劣化度と ASR ゲルの化学組成

ASRゲルの化学組成に関するHerumuth-Starkモデルによると、ASRゲルはカルシウム含有珪酸アルカリ水和物($(\text{Na}_2\text{O}(\text{K}_2\text{O})\text{-CaO-SiO}_2)$)であり、シリカ(SiO_2)の質量百分率が40%程度で非膨張性(吸水性のない、粘性(剛性)の高いゲル)のASRゲルになるとされている¹²⁾。このような観点から、骨材粒子内のASRゲルの化学組成を調べることで、コンクリートの膨張性を推定する試みがなされている。安山岩碎石を用いたコンクリート(無混和, FA2L)において、安山岩粒子内のひび割れに存在するASRゲルの化学組成を図-4および図-5に示す。安山岩粒子内のASRゲルの化学組成は比較的安定していると考えられる。しかし、骨材の界面近傍に存在するASRゲルはセメントペースト相からカルシウムイオンが拡散するので、界面付近のASRゲルはカルシウム分が相対的に多くなる傾向があった。このようにASRゲルの化学組成の分析では局所的なばらつきの影響にも注意することが重要である。フライアッシュ無混和における安山岩碎石中のASRゲルの化学組成(質量百分率)は、アルカリ分(R_2O)が9%、カルシウム分(CaO)が15%、シリカ分(SiO_2)が77%であった(図-4参照)。また、フライアッシュを混和したものは、アルカリ分(R_2O)が9%、カルシウム分(CaO)が13%、シリカ分(SiO_2)が78%となり、シリカ分が多くカルシウム分が低い化学組成となった(図-5参照)。フライアッシュの有無に関係なく、骨材粒子内のひび割れに存在するASRゲルの化学組成はほぼ同一であり、ASRゲルの化学組成は吸水膨張性を有するものと判断できた。したがって、コンクリートの膨張挙動の相違は、反応性骨材とアルカリとの量的な相互関係から決まるが、その程度は反応性骨材から生成したASRゲルの量に比例していると想定された。

ASRゲルの化学組成(Ca/Si 比および $\text{Ca}/(\text{Na}+\text{K})$ 比)を図-6~図-8に示す。ここでは骨材界面からセメントペースト中に進展したひび割れや気泡中のASRゲルの化学組成を連続的に分析している。図-6~図-8に示すように、安山岩碎石および川砂利(無混和)のASRゲルの Ca/Si 比と $\text{Ca}/(\text{Na}+\text{K})$ 比(logスケール)はほぼ直線上に存在するのに対して、フライアッシュ混和のものはばらつきが大きくなり、直線上からはずれてくるのが分かる。骨材内部や界面で生成したASRゲルはセメントペースト中のひび割れを通過して移動する過程で水酸化カルシウムを取り込み、ASRゲルの流動性が失われるとともに、吸水膨張性が低下することが知られている⁸⁾。セメントの水和生成物(CSH)のC/S比は1.5程度であるので、カルシウムが取り込まれていく過程でASRゲルの性質もCSHに次第に類似したものになる。同様に、気泡中には水酸化カルシウムが多く存在するので、気泡内に滞留した

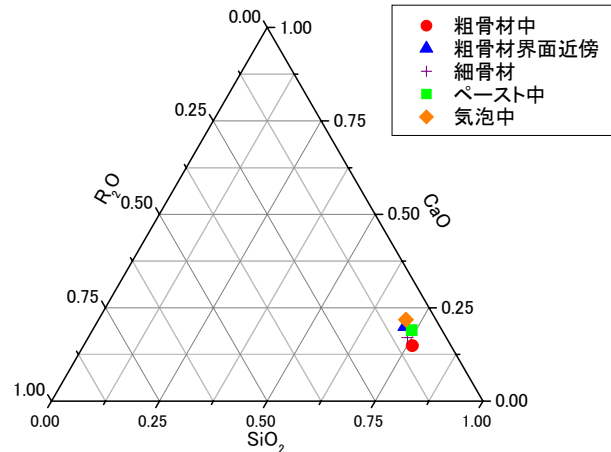


図-4 ASR ゲルの化学組成(安山岩, FA 無混和)

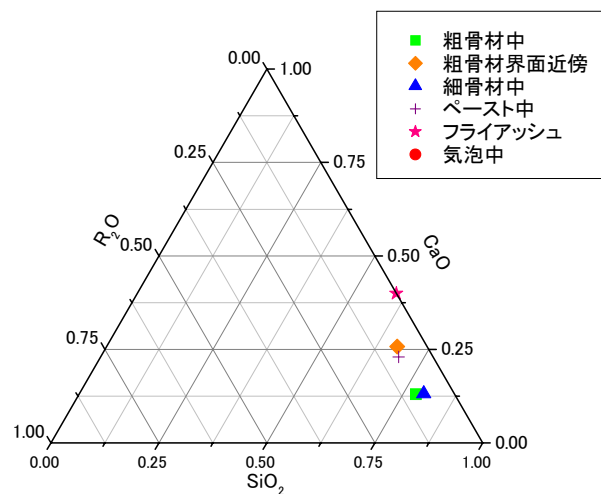


図-5 ASR ゲルの化学組成(安山岩, FA2L)

ASRゲルは吸水膨張性や粘性が急激に消失することになる。フライアッシュを含有したコンクリートでは、骨材界面やセメントペースト中の水酸化カルシウムがポゾラン反応によって大きく減少していることが特徴であり、そのことはASRゲルがひび割れを移動する際の流動性および吸水膨張性の低下が生じにくくしているものと推察される。なお、ひび割れ中のASRゲルの化学組成は、骨材界面からの測定位置によっても影響を受けるため、これについても今後考察を加えることとする。

5. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると次のようである。
 (1) 2種類の反応性骨材を使用したコンクリートの膨張挙動は、それぞれの反応性骨材に含有される反応性鉱物の種類とその量の相違によって説明することができた。また、安山岩碎石の反応の程度は骨材粒径とも関係しているものと推察された。
 (2) 安山岩碎石において、アルカリ量 8kg/m^3 の条件下でASRを確実に抑制するには、フライアッシュの品質

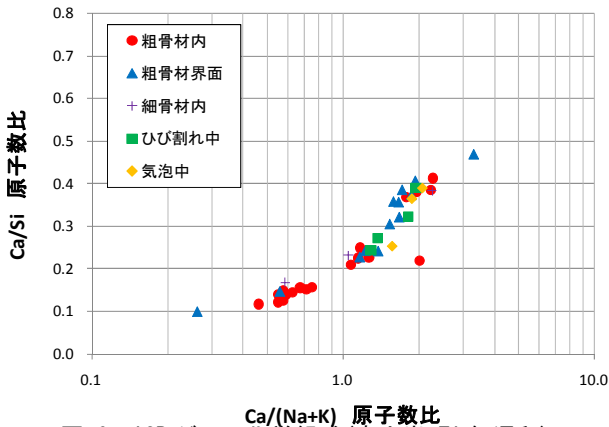


図-6 ASR ゲルの化学組成 (安山岩, FA 無混和)

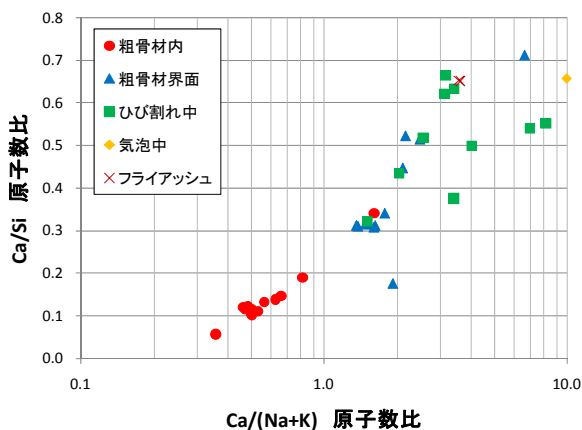


図-7 ASR ゲルの化学組成 (安山岩, FA2L)

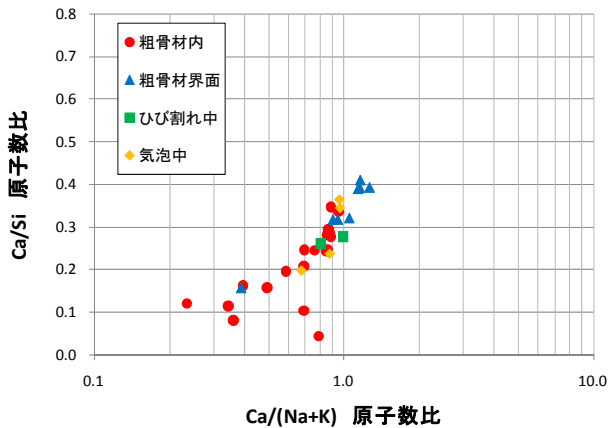


図-8 ASR ゲルの化学組成 (川砂利, FA 無混和)

に関係なくフライアッシュ置換率が 20%以上で可能であり、さらに低品質の原粉でも骨材の反応性に応じた、適切な置換率を選定することにより ASR 抑制効果が期待できた。

(3)フライアッシュの有無に関係なく、骨材中の ASR ゲルの化学組成はほぼ同一であり、ASR ゲルの化学組成は吸水膨張性を有するものであった。また、骨材の界面近傍に存在する ASR ゲルはセメントペースト相からカルシウムイオンが拡散し、カルシウム分が多いものに急激に変化していた。

参考文献

- 1) 川村満紀, 榎場重正: アルカリ・シリカ反応とその防止対策, 土木学会論文集, No.348, V-1, pp.13-26, 1984.8
- 2) 川村満紀: 骨材とコンクリート構造物の耐久性, 材料, Vol.40, No.459, pp.1603-1609, 1991.12
- 3) Katayama, T., Oshiro, T., Sarai, Y., Zaha, K., and Yamato, T.: Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan, Proceedings of the 13th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, PP.862-873, 2008
- 4) 山戸博晃, 小村知美, オスバルド・アンドラード, 鳥居和之: 放射性廃棄物からのナトリウム塩によるアルカリシリカ反応の発生機構, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.911-916, 2010.7
- 5) 小村知美, 山戸博晃, オスバルド・アンドラード, 鳥居和之: 融氷剤によるコンクリートの ASR 発生機構とその防止対策, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.905-910, 2010.7
- 6) 西林新蔵, 小谷憲司, 高見新一, 黒田保: 低品位フライアッシュの ASR 抑制に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.53-58, 2003.7
- 7) 大代武志, 平野貴宣, 鳥居和之: 富山県の反応性骨材と ASR 劣化構造物の特徴, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1251-1256, 2007.7
- 8) Katayama, T., Bragg, D.J.: Alkali-aggregate reaction combined with freeze/thaw in Newfoundland, Canada -petrography using EPMA, Proceedings of the 10th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Melbourne, Australia, PP.243-250, 1996
- 9) 川端雄一郎, 山田一夫, 松下博通: 岩石学的分析に基づいた安山岩の ASR 反応性評価および膨張挙動解析, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.4, pp.689-703, 2007
- 10) 鍵本広之, 佐藤道生, 川村満紀: アルカリシリカ反応により劣化した構造物の劣化度評価と細孔溶液分析による劣化進行の予測, 土木学会論文集, Vol.46, No.641, pp.241-251, 2000
- 11) Imai, H., Yamasaki, T., Maehara, H., and Miyagawa, T.: The Deterioration by Alkali-Silica Reaction of Hanshin Expressway Concrete Structures Investigation and Repair, Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Proceedings of the 7th International Conference, pp.131-135, 1986
- 12) 川村満紀, S.チャタジー: コンクリートの材料科学, 森北出版, pp.176-193, 2002