

# 論文 砂のアルカリシリカ反応性評価と建設工事における ASR 抑制対策

久保哲司\*1・佐野朝恵\*2・参納千夏男\*3・鳥居和之\*4

**要旨**：本研究では、建設工事で使用する生コンクリートプラントの砂に関してアルカリシリカ反応性を各種試験方法により試験した。その結果、川砂を使用した場合に、促進モルタルバー試験で膨張挙動が確認されたが、ASR ゲルの生成状況と薄片のひび割れ発生状況との比較から、内部に骨材の割れを伴うようなひび割れがほとんどない場合であっても微小な粒子の反応によって生成した ASR ゲルが膨張に寄与していることが示唆された。また、フライアッシュをセメントの 15%質量置換または砂の 7%容積置換することによって、建設工事において効果的に ASR を抑制できることが示された。

**キーワード**：砂の反応性, ASR 抑制対策, フライアッシュ, ゲルフルオレッセンス法, 偏光顕微鏡観察

## 1. はじめに

北陸地方においては、これまで ASR に関して反応性骨材の特徴や反応性などが詳細に調査され、ASR の発生実態がかなり把握されてきている<sup>1,2)</sup>。また、ASR 抑制対策として JIS A5308「レディーミクストコンクリート」に推奨されているアルカリ総量(3kg/m<sup>3</sup>以下)を順守した場合でも、反応性が高い骨材を使用した場合や外部環境から供給されるアルカリの影響がある場合には、ASR が発生する恐れがあることから、北陸地方ではフライアッシュの使用が提案されている<sup>3)</sup>。一方、国内では JR 東日本は、既に独自に、化学法とモルタルバー法の基準を設定し、「準有害」と判定された場合には、「アルカリ総量を 2.2kg/m<sup>3</sup>に規制する対策もしくは混合セメント等による対策」を適用している<sup>4)</sup>。さらに、海外では、構造物の重要度と使用・環境条件に応じて、アルカリ総量を規制した上でさらに、フライアッシュ等を混和する規定が運用されている事例もある<sup>5)</sup>。これらの状況を鑑みれば、ASR が発生する恐れがある場合には、JIS による基準を満足させるだけでは不十分であり、使用材料や環境条件を考慮した個別の対応がさらに必要であると言える。

今回、富山県の火力発電所の建設工事で使用される生コンクリートプラントの砂が、化学法(JIS A1145)では「無害」と判定されているが、同地方の砂は骨材からのアルカリが溶出する影響が指摘されていたこと<sup>6)</sup>、建設計画には高強度の配合の構造物があること、使用・環境条件が沿岸部で飛来塩分の影響があること等から、砂の反応性を詳細に調査し対策を検討する必要があると考えられた。そこで本研究では、これらの砂の岩石学的調査および化学法と促進モルタルバー法(ASTM C1260)による反応性の評価を行った。反応性の評価に際しては、促進

モルタルバー法による促進養生後の試料を用いて ASR ゲル生成状況とひび割れ発生状況の観察を行い、砂が起因する ASR に関して 2, 3 の考察を加えた。さらに、評価結果を踏まえたより厳しい ASR 抑制対策の考え方を本建設工事において適用した。

## 2. 試験方法

### 2.1 岩種判定

生コンクリートプラントで使用されている砂 5 種類(S1～S5 と呼ぶ)をそれぞれエポキシ樹脂で固めた後、20mm×20mm 程度のチップを切り出し、薄片試料(厚さ: 20μm)を作製し、偏光顕微鏡により、砂を構成する岩石や鉱物を確認した。この際、特に ASR を生じる可能性のある岩石(安山岩、流紋岩質溶結凝灰岩、チャートなど)に着目した。岩石や鉱物の構成割合は、間隔 0.5mm、測定点数 300 点のポイントカウンティングにより求めた。

### 2.2 アルカリシリカ反応性の確認

岩種判定した砂 5 種類(S1～S5)に関して、化学法(JIS A1145)と促進モルタルバー法(ASTM C1260)を適用した。促進養生期間中の長さ測定は、浸漬開始後 3,7,10,14 および 28 日に行い、判定は 14 日の測定結果により行った。

### 2.3 ASR ゲル生成状況の観察

促進モルタルバー法による促進養生後(28 日後)の試料を切断し、切断面(25mm×25mm)にゲルフルオレッセンス法を適用した<sup>7)</sup>。ゲルフルオレッセンス法は、希釈酢酸ウラニル溶液を切断面に塗布し、暗室状態で紫外線を照射し、ASR ゲルが発光することにより、ASR ゲルの生成状況を確認する手法であり、発光面積とコンクリートブリズムとの相関性があることが示されている<sup>8)</sup>。なお、

\*1 北陸電力(株) 志賀原子力発電所保修部土木建築課(正会員)

\*2 北陸電力(株) 土木部

\*3 北陸電力(株) 土木部土木技術チーム 博(工)(正会員)

\*4 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 教授 工博(フェロー会員)

試料表面から 5 mm 以内の深さの範囲を外部, 5 mm 以上の深さの範囲を内部とし, 観察した。

### 2.4 ひび割れ発生状況の観察

促進モルタルバー法による促進養生後(28 日後)の試料から薄片試料(厚さ: 20 μm)を作製し, 偏光顕微鏡により骨材の ASR 発生と膨張ひび割れの進展状況を観察した。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 砂の岩種判定

砂の岩種判定の結果を表-1 に, 偏光顕微鏡による薄片観察の一部(S4 および S5)を写真-1 に示す。S1 の主岩種は ASR 反応性を示さない花崗岩質岩を起源とする岩片と結晶破片ならびに貝殻片であった。海に近い場所で採取された陸砂であるため, 貝殻片が多く含まれていたものと推測される。ASR 反応性を示す流紋岩質溶結凝灰岩, 安山岩, チャートなどの岩片の量比は少量であり, その影響は限定的なものと考えられた。S2 には, 高い ASR 反応性を示す安山岩などの粒子は少なかったが, 遅延膨張性の流紋岩質溶結凝灰岩と隠微晶質石英を含む

表-1 砂の岩種類判定の結果

砂の記号	種別	岩石又は鉱物	量比(Vol.%)	主要な構成鉱物(概ね構成量比の多いものから順に記載)
S1 (陸砂)	岩片	花崗岩質	24	石英, 斜長石, カリ長石, 黒雲母, 白雲母
		流紋岩質 溶結凝灰岩	6	隠微晶質石英*, 石英, 斜長石, カリ長石, 緑泥石, 絹雲母
		安山岩	2	斜長石, クリスタバライト*, トリディマイト*, ガラス*, 輝石, 不透明鉱物
		砂岩	2	石英, 斜長石, イライト, 緑泥石
		頁岩	1	石英, 斜長石, 白雲母, イライト, 緑泥石, 隠微晶質石英*
		チャート	3	隠微晶質石英*, 石英
	結晶片		41	石英, 斜長石, カリ長石ほか
	貝殻片		21	方解石, アラゴナイト
S2 (庄川上流産)	岩片	花崗岩質	13	石英, 斜長石, カリ長石, 黒雲母
		閃緑岩	9	斜長石, 角閃石, 黒雲母
		珪長岩	3	石英, 隠微晶質石英*, カリ長石, 斜長石
		流紋岩質 溶結凝灰岩	35	隠微晶質石英*, 石英, 斜長石, カリ長石, 緑泥石, 絹雲母
		安山岩	2	斜長石, ガラス*, 輝石, クリスタバライト*, トリディマイト*, 不透明鉱物
		砂岩	5	石英, 斜長石, カリ長石, イライト, 緑泥石
		頁岩	2	イライト, 緑泥石, 石英, 隠微晶質石英*, 斜長石
		チャート	2	隠微晶質石英*, 石英, イライト, 緑泥石
		黒雲母岩 ホルンフェルス	1	石英, 斜長石, 隠微晶質石英*, 黒雲母, 白雲母
	結晶片		28	石英, 斜長石, カリ長石ほか
S3 (庄川下流産)	岩片	花崗岩質	22	石英, 斜長石, カリ長石, 黒雲母, 緑泥石, 白雲母
		閃緑岩	9	斜長石, 角閃石, 緑泥石, 緑れん石
		珪長岩	2	石英, 隠微晶質石英*, カリ長石, 斜長石
		流紋岩質 溶結凝灰岩	41	隠微晶質石英*, 石英, 斜長石, カリ長石, 緑泥石, 絹雲母
		安山岩	3	斜長石, ガラス*, 輝石, クリスタバライト*, トリディマイト*, 不透明鉱物
		砂岩	3	石英, 斜長石, イライト, 緑泥石
	チャート	2	隠微晶質石英*, 石英	
結晶片		18	石英, 斜長石, カリ長石ほか	
S4 (小矢部川産)	岩片	花崗岩質	19	石英, 斜長石, カリ長石, 緑泥石, 黒雲母
		閃緑岩	10	斜長石, 角閃石, 黒雲母, 不透明鉱物
		珪長岩	4	石英, 隠微晶質石英*, カリ長石, 斜長石
		流紋岩質 溶結凝灰岩	32	隠微晶質石英*, 石英, 斜長石, カリ長石, 緑泥石, 絹雲母
		安山岩	4	斜長石, 輝石, ガラス*, クリスタバライト*, トリディマイト*, 不透明鉱物
		頁岩	3	石英, 斜長石, 白雲母, イライト, 緑泥石, 隠微晶質石英*
	チャート	4	隠微晶質石英*, 石英	
結晶片		24	石英, 斜長石, カリ長石ほか	
S5 (神通川産)	岩片	花崗岩質	26	石英, 斜長石, カリ長石, 黒雲母, 緑泥石
		閃緑岩	9	斜長石, 角閃石, 輝石, 黒雲母, 石英, 不透明鉱物
		流紋岩質 溶結凝灰岩	19	隠微晶質石英*, 石英, 斜長石, カリ長石, 緑泥石, 絹雲母
		安山岩	2	斜長石, ガラス*, クリスタバライト*, トリディマイト*, 輝石, 不透明鉱物
		砂岩	1	石英, 斜長石, 白雲母, イライト, 緑泥石, 隠微晶質石英*
		頁岩	3	石英, 斜長石, 白雲母, 隠微晶質石英*, 緑泥石, イライト
		チャート	2	隠微晶質石英*, 石英, 緑泥石
		黒雲母岩 ホルンフェルス	3	石英, 斜長石, 黒雲母, 隠微晶質石英*, 白雲母, 角閃石
	雲母片岩	3	石英, 斜長石, 白雲母, 緑泥石, 緑れん石	
緑色片岩	2	緑れん石, 角閃石, 輝石, 斜長石		
結晶片		30	石英, 斜長石, カリ長石ほか	

\* : アルカリシリカ反応性を示す鉱物

チャート、珪長岩などの岩片が比較的多く含まれていた。また、S2が採取される水系の流紋岩質溶結凝灰岩はコンクリート中でアルカリを溶出する可能性が指摘されており<sup>9)</sup>、ASR対策の要否と内容について再検討すべきであると考えられた。S3は、S2と同じ水系の下流で採取されている川砂であり、その岩種構成はS2と類似していた。S4は、S2およびS3と水系は異なるが、水源が近いいためその岩種構成はS2およびS3と類似していた。S5には、高いASR反応性を示す安山岩などの粒子は少なかったが、流紋岩質溶結凝灰岩、チャート、黒雲母ホルンフェルス、頁岩、雲母片岩などの岩片が比較的多く含まれていた。S2,S3,S4,S5は、安山岩と流紋岩質溶結凝灰岩を合わせた含有率がペシマム条件に相当している恐れがあり、促進モルタルバー法によりASR反応性を確認して使用するなどの注意が必要であると考えられた<sup>9)</sup>。

### 3.2 アルカリシリカ反応性の確認

化学法(JIS A1145)の結果を図-1に、促進モルタルバー法(ASTM C1260)の結果を図-2にそれぞれ示す。図-1には、JISの判定基準線に加えてJR東日本の判定線を示す<sup>4)</sup>。図に示す通り、JISの判定基準では、いずれの砂も「無害」の判定であったが、JR東日本の判定基準では、S2~S5が「準有害」の判定(JIS基準とJR東日本基準の判定線の間の領域)であった。また、促進モルタルバー法では、反応性鉱物として流紋岩質溶結凝灰岩とクリス

トバライト、トリディマイトを含む安山岩の含有率が20~50%のS2~S5は「有害」、それらの含有率が8%と低いS1は「無害」の判定であった。S5の膨張率が最も高かったが、その他の反応性鉱物を含む岩種も含めると29%であり、ペシマム混合率に近いことが影響していると推察される<sup>9)</sup>。この結果より、S2~S5はJIS法(化学法)では「無害」であるが、JR東日本のより厳しい判定条件とASTM C1260のより厳しい試験条件の下では、ASRが発生する可能性が一致して示されたことから、ASR抑制対策を検討する必要があると考えられた。

前述したように、今回調査対象とした砂は、火力発電所の建設工事で使用される生コンクリートプラントで実際に使用されている砂であり、アルカリシリカ反応性が確認されたことより、ASR抑制対策を再検討することとした。抑制対策としては、北陸地方においてASR抑制効果が確認されており、建設地点で入手可能な石川県七尾大田火力発電所産の分級フライアッシュの使用を検討することとした<sup>10)</sup>。火力発電所では、重要構造物としてタンクの建設(設計強度60N/mm<sup>2</sup>)が計画されており、発熱量抑制の観点から低熱ポルトランドセメント(LPC)の使用を前提とした配合が既に決まっていた。そこで、フライアッシュは、砂の容積置換(外割置換)とし、配合修正に与える影響を最小限にすることとした。置換率は、試験練りにて良好なフレッシュ性状が確認された

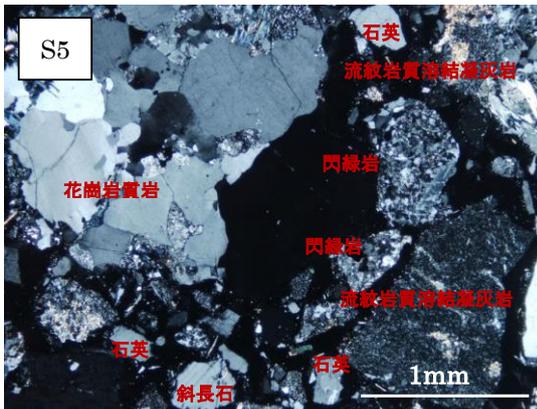
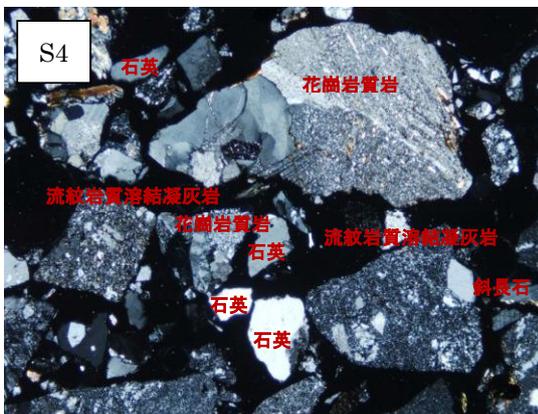


写真-1 代表的な砂(S4, S5)の薄片観察結果

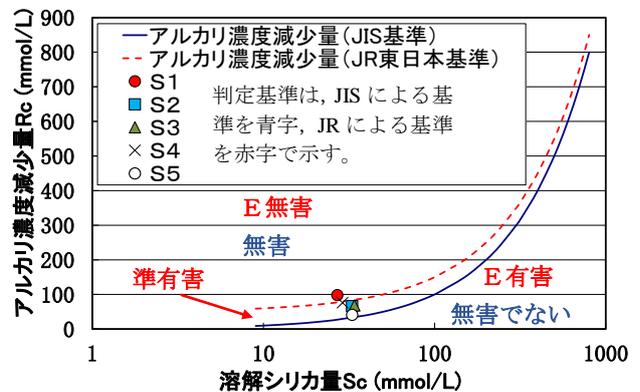


図-1 化学法の結果

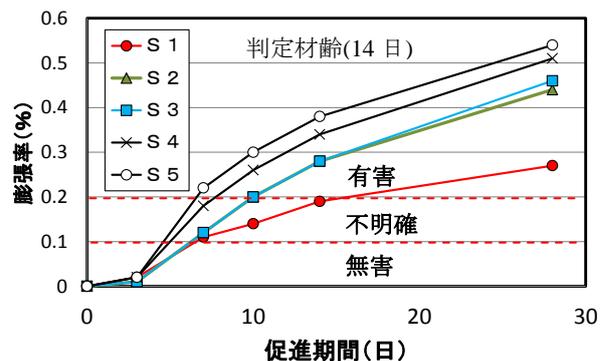


図-2 促進モルタルバー法の結果

外割り 7% (セメント内割り置換で 13%相当) とした。さらに、その他の普通ポルトランドセメント (OPC) を使用する一般構造物においてもフライアッシュの適用を検討し、その際の置換率はセメント内割り 15%と設定した<sup>3,10)</sup>。これらの配合に関して、フライアッシュによる ASR 抑制効果を確認することを目的として、促進モルタルバー試験において最も高い膨張率を示した S5 を用いて試験を行った。試験では、石川県七尾大田火力発電所産の分級フライアッシュ (密度 2.49g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 4.870cm<sup>2</sup>/g) を用いた。表-2 に試験で使用した配合を図-3 に促進モルタルバー法 (ASTM C1260) の結果をそれぞれ示す。フライアッシュを混和しない場合には、OPC を使用した場合も LPC を使用した場合も、14 日材齢において 0.2%以上の膨張率を示し、ASTM C1260 の判定基準では、「有害」判定であった。なお、OPC は図-2 のデータを再掲した。しかしながら各々の膨張率には違いがあり、普通ポルトランドセメント (OPC : アルカリ量 0.52%) を使用した方が、低熱ポルトランドセメント (LPC : アルカリ量 0.35%) を使用した場合よりも大きな膨張率であった。これは各々のセメントによるアルカリ量の違いが影響していると考えられる。一方、フライアッシュを混和した場合には、OPC を使用しフライアッシュを 15%内割り置換した場合も、LPC を使用しフライアッシュを 7%外割り置換した場合も膨張率は小さくなり、14 日材齢において 0.1%未満の膨張率を示し、ASTM C1260 の判定基準では、「無害」の判定であった。また、膨張率は、OPC を使用した場合の方が大きく、フライアッシュを混和しない場合と同じ傾向を示した。OPC を使

用した場合には、セメントを 15%減じた分のアルカリ量が低減されているが、表-2 に示すように LPC よりもアルカリ量が高いことが膨張率の違いに影響していると推察される。これは、セメントのアルカリ量が ASR の進展に及ぼす影響が大きいことを示しており、フライアッシュ等による ASR 抑制対策を適用した場合であってもセメントに含まれるアルカリ量も留意する必要があることを示唆している。

### 3.3 ASR ゲル生成状況の観察

図-3 で示した促進モルタルバー法 (ASTM C1260) による促進養生後 (28 日後) の試料を用い、切断面 (25mm × 25mm) にゲルフルオレッセンス法を適用した結果を写真-2 に示す。OPC 使用の場合には、断面全体に強い発光が確認された。一方、LPC の場合には、OPC と比較して発光は弱く、表面から 1/3 (7mm) 程度の範囲は発光していたが、内部の発光は限定的であった。外部の発光は、NaOH の浸透により ASR が促進されたものと考えられる。内部の ASR ゲルの生成状況の違いは、セメントのアルカリ量の違いが影響しており、これが促進モルタルバーの膨張量の違いにも表れていると考えられる。それに対して、フライアッシュを混和した場合には、OPC を使用した場合も LPC を使用した場合も、それぞれ OPC と比べて発光が弱くなっており、ASR ゲルの生成が効果的に抑制されていた。また、写真-3 の OPC における拡大写真に示す通り、直径 0.1mm 以下程度の微小粒子の周囲で特に強く発光するとともに、周囲のセメントペースト部を埋めるように発光が広がっている状況が確認された。これは、微小粒子の反応で生成された ASR ゲルが周囲のセ

表-2 配合

ケース(セメント種類)	配合 (g/バッチ)				
	W	C	FA	S	アルカリ量*
OPC	207	440	-	990	2.3
LPC	207	440	-	990	1.5
FA15%内割り(OPC)	207	374	66	990	1.9
FA7%外割り(LPC)	207	440	67	921	1.5

\* : アルカリ量 (g/バッチ) はセメント分のみを示す。

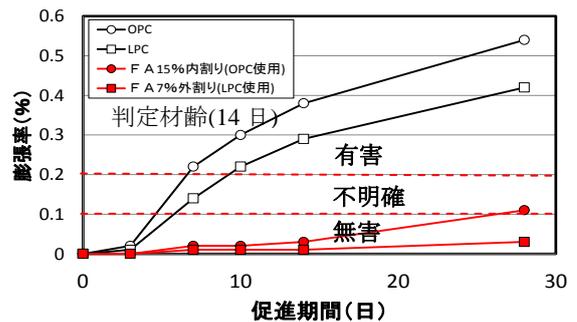


図-3 促進モルタルバー法の結果

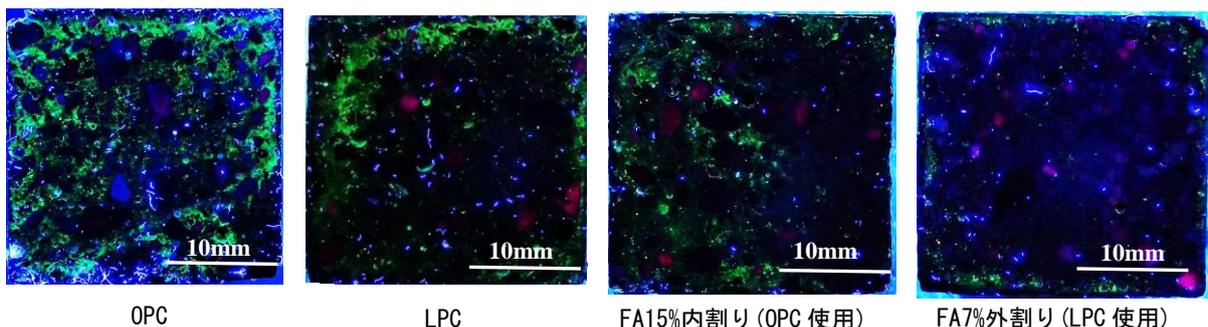


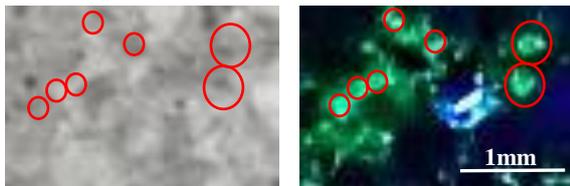
写真-2 ゲルフルオレッセンス法による発光状況 (全体)

メントペースト部を充填していることを示している。

### 3.4 ひび割れ発生状況の観察

写真-4にモルタル薄片の偏光顕微鏡による観察結果の一部を例として示す。OPC(写真-4(a)参照)では、外部において、流紋岩質溶結凝灰岩や安山岩粒子に割れを伴いセメントペーストまで伸びている微細なひび割れが6本確認されたが、内部において、ひび割れは少なかった。LPC(写真-4(c)参照)では、同様に、ひび割れは外部に8本確認されたが、内部においてはほとんど確認されなかった。それに対して、フライアッシュを混和した場合には、OPC使用(写真-4(d)参照)では、外部にひび割れが8本確認されたが、内部にひび割れは無く、また LOC 使用では全体的にひび割れはほとんど無く、外部に1本確認されただけであった。

以上のように、ひび割れの発生は部分的なものであったが、写真-4(b)に示すようなクリストバライトを含む0.1mm以下の微小粒子の周囲がゲル状物質で取り囲

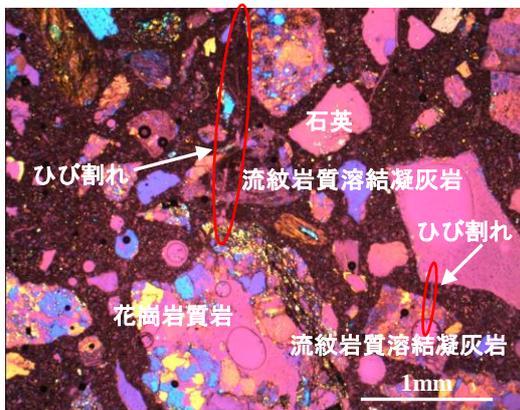


白色灯下  
写真-3 紫外線照射下  
ASR ゲル観察状況 (OPC)

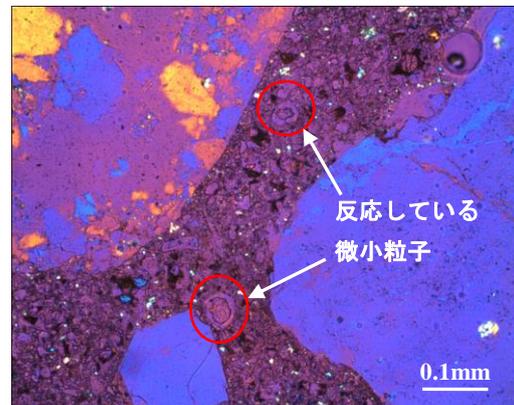
まれている状況が前述の ASR ゲル生成範囲(写真-2)において確認された。このような状況は、OPCにおいて特に多く見られたが、FA7%外割り(LPC 使用)では、ほとんど見られなかった。

### 3.5 砂のアルカリシリカ反応性の評価

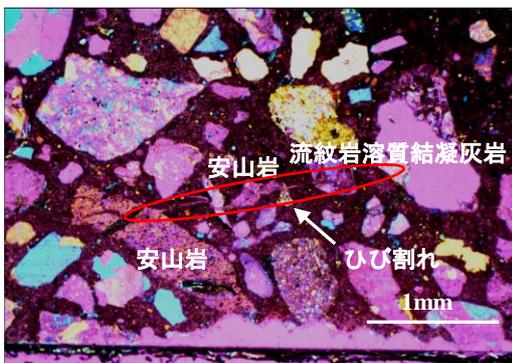
表-3に促進モルタルバー試験結果、ASR ゲル生成状況および薄片観察結果のそれぞれの概略を合わせて示す。促進モルタルバーの膨張率と ASR ゲルの生成状況とはよく対応しており、ASR ゲルの生成量が多い方が膨張率は高い傾向であった。また、薄片観察の結果、ひび割れの本数に着目した場合、OPC、LPC および FA15%内割り(OPC 使用)に違いは見られなかったが、促進モルタルバーの膨張率は異なる結果であった。OPC では、内部に ASR ゲルの生成が確認されたが、ひび割れはほとんど確認されなかった。その一方で、FA15%内割り(OPC 使用)では、ひび割れの発生状況は、OPC と類似していたが、膨張率は大きく抑制されていた。この両者の違いは、ASR ゲルの生成量の違いにあると考えられる。ASR の膨張圧発現機構には諸説あり、ASR 膨張には骨材の割れに伴い発生する内部膨張力が大きく関与しているとの報告があるが<sup>11)</sup>、前述の ASR ゲルの観察結果(写真-3および写真-4(b))も合わせて考えると、反応性物質で構成される微小粒子が反応することによって生成された ASR ゲルがセメントペースト部を充填し、膨張に寄与してい



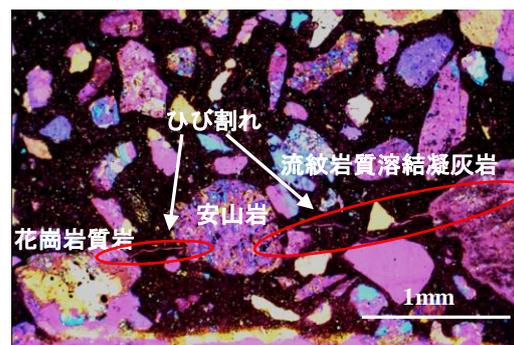
(a) OPC(外部)



(b) OPC(内部, 拡大)



(c) LPC(外部)



(d) FA15%内割り (OPC 使用, 外部)

写真-4 偏光顕微鏡によるモルタルバーの観察結果(直交ニコル下, 石こう検板使用)

表－3 試験結果のまとめ

	膨張率 (14日材齢)	ASR ゲル生成状況		ひび割れ発生状況*2	
		外部*1	内部*1	外部*1	内部*1
OPC	大きい(0.38%)	多い	多い	多い(6本)	少ない(1本)
LPC	大きい(0.29%)	多い	少ない	多い(8本)	無い(0本)
FA15%内割り(OPC使用)	小さい(0.03%)	少ない	少ない	多い(8本)	無い(0本)
FA7%外割り(LPC使用)	小さい(0.01%)	少ない	ほとんど無い	少ない(1本)	無い(0本)

\*1：外部は、試料(25mm×25mm)の表面から5mm以内の深さの範囲を、内部は5mm以上の深さの範囲とした。

\*2：( )は、ひび割れの数を示し、骨材の割れを伴いセメントペーストまで伸びているひび割れの本数とした。

ることが示唆された。

### 3.6 建設工事における ASR 抑制対策の適用

今回の評価結果を踏まえ、火力発電所建設工事において JIS で規定される以上のより厳しい ASR 抑制対策を適用することとした。すなわち、LNG タンクは、アルカリ量の少ない低熱ポルトランドセメントを使用するが、呼び強度が 60 と高く、既往の調査データより、砂からのアルカリ溶出量を 0.4mg/g 考慮した場合<sup>6)</sup>、アルカリ総量が 2.2kg/m<sup>3</sup>以上となるため、フライアッシュを砂の 7% 容積置換(外割り)で使用することとした<sup>5)</sup>。さらに、その他の普通ポルトランドセメントを使用する一般構造物において、アルカリ総量は 3kg/m<sup>3</sup>以下であるが、フライアッシュをセメントの 15% 重量置換(内割り)で使用することとした。

## 4. 結 論

本研究で得られた主な結果は以下に示す通りである。

- (1) 化学法(JIS A1145)で「無害」判定の骨材を使用し、促進モルタルバー試験(ASTM C1260)を実施したところ「有害」判定結果となったが、使用セメントの種類の違いによって膨張率や ASR ゲルの生成状況が異なり、セメント由来のアルカリ量の違いが影響していると推察された。
- (2) 建設工事で実際に使用される川砂に関して、フライアッシュを内割り 15% 置換(セメント置換)または外割り 7% 置換(砂置換)することによって、ASR 膨張を効果的に抑制することが可能であった。
- (3) 川砂を使用した場合に、促進モルタルバーの膨張率、ASR ゲルの生成状況および薄片のひび割れ発生状況との比較から、内部に骨材の割れを伴うようなひび割れがほとんどない場合であっても、微小な骨材粒子が反応することによって生成した ASR ゲルが膨張に寄与していることが示唆された。

### 参考文献

- 1) 金沢大学 SIP-WG2(ASR 部会)、コンクリート橋の早期劣化機構の解明と材料・構造性能評価に基づくトータルマネジメントの開発 研究成果報告書－陸

地方における ASR 問題の解決を目指して－, 2016

- 2) 大代武志, 野村昌弘, 参納千夏男, 鳥居和之: 富山県における ASR 劣化橋梁の実態調査とその地域特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1059-1064, 2016
- 3) 鳥居和之, 参納千夏男: 骨材資源の活用を目指したアルカリシリカ反応抑制対策の提案, コンクリート工学, Vol.48, No.1, pp.44-47, 2010
- 4) 松田芳範: JR 東日本における混和材使用の現状と課題, コンクリート工学, Vol.52, No.5, pp.459-463, 2014
- 5) Thomas, M., Fournier, B.: AAR in North America, Recommended practices for testing aggregates and selecting preventive measures, Concrete in Australia, Vol.41, No.2, pp.59-64, 2015
- 6) 鳥居和之, 野村昌弘, 南善導: 北陸地方の川砂のアルカリシリカ反応性とアルカリ溶出性状, セメントコンクリート論文集, No.60, pp.390-395, 2006
- 7) 参納千夏男, 丸山達也, 山戸博晃, 鳥居和之: ゲルフルオレスセンス法による ASR 簡易診断手法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.973-978, 2013
- 8) Igarashi, G., Yamada, K., Xu, Y., Wong, H., Hirono, S., Ogawa, S.: Image Analysis of Alkali-Aggregate Gel in Concrete Prism Test with Alkali-Wrapping, Proc. of 15th Inter. Conf. on Alkali-aggregate Reaction in Concrete, 10pages, 2016
- 9) 菊地弘紀, 山戸博晃, 広野真一, 鳥居和之: 細・粗骨材の組み合わせのペシマム現象による ASR 劣化事例の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1041-1046, 2016
- 10) 北陸地方におけるフライアッシュのコンクリートへの有効利用促進検討委員会報告書(富山・石川・福井県版), 2013
- 11) 川端雄一郎, 広野真一, 岩波光保, 加藤絵万: 岩石学的観察に基づく ASR による各種反応性骨材の損傷形態と損傷過程の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1031-1036, 2011