

論文 少量添加で ASR 膨張を抑制するガラス微粉末の粒度と組成

安田 瑛紀^{*1}・黒野 承太郎^{*1}・岸良 竜^{*2}・河野 克哉^{*3}

要旨: アルカリシリカ反応 (ASR) を抑制する混和材としてガラス微粉末に注目し、粒径と化学組成が異なるガラス微粉末をそれぞれ添加したモルタルの膨張量を比較した。化学組成のうち SiO₂ を多く含むガラス微粉末をセメントの内割で 5% 添加することで、膨張量が減少すると同時に圧縮強度は増加した。このモルタル内部を偏光顕微鏡で観察したところ、混和材を使用していないモルタルでは ASR によって激しい劣化を生じていたのに対して、ガラス微粉末を添加した場合にはごく軽微な損傷であった。EDS 定量分析により反応生成物の組成を調べた結果から、低 Ca/Si 比の C-S-H を生じることで ASR が抑制されたものと考察した。

キーワード: アルカリシリカ反応, ガラス微粉末, 混和材, モルタルバー法, 偏光顕微鏡, SEM-EDS

1. はじめに

アルカリシリカ反応 (以下, ASR) によりコンクリートに有害な膨張やひび割れが生じると、構造物の耐久性は大きく低下する。材料面から ASR を抑制する方策としては、アルカリ総量規制 (3.0kg/m³以下) を遵守することに加えて、混合セメントや安全と認められる骨材を使用することが挙げられる¹⁾。実用的には無害な骨材のみを使用することは難しい場合があり、良質な天然骨材に乏しい地域などでは対応できない。そこでフライアッシュや高炉スラグを用いた混合セメントによる対策が期待されるものの、初期強度が不足することや、コンクリート製造工場において貯蔵設備を確保する必要があることなどの問題がある。

ASR によって生じる膨張量には、使用する材料の寸法と Si (ケイ素) の含有量が影響する。例えば、反応性骨材がコンクリート中に含まれるとき、骨材は粒径が比較的大きくセメントペーストと接する面積は小さいため、骨材から Si が局所的に溶出することで吸水膨張性のゲルを生じる。一方で、フライアッシュがコンクリート中に含まれるとき、そのポゾラン反応も非晶質な Si に起因したものであるが、フライアッシュの粒子が微細なためにセメントペースト中で一様に広く分散して反応を起こすために膨張を伴わない²⁾。このことは、粒径が細かく SiO₂ 含有量の多いフライアッシュであるほど ASR 抑制効果が大きいという長瀧ら³⁾の研究や、反応性骨材の粒径によってモルタルの膨張量が変化するという著者ら⁴⁾の研究からも明らかである。

本検討では、少量で ASR の抑制が期待できる混和材としてガラス微粉末に注目し、モルタルの膨張量に与える影響を検討した。さらに、ASR 促進試験後のモルタル内部を顕微鏡観察に供することで ASR による劣化の程度を診断するとともに、ASR 抑制のメカニズムを考察した。

2. モルタル試験の内容

2.1 試験水準

混和材の種類と使用量が異なるモルタルを作製し、ASR 促進環境における膨張量と圧縮強度を測定した。試験水準は表-1 に示す 13 水準である。混和材にはフライアッシュ、高炉スラグ微粉末およびガラス微粉末を使用し、ガラス微粉末は粒度と化学組成が異なる 5 種類を用意した。混和材はいずれもセメントに対して質量比で内割置換した。フライアッシュの使用量は 15% (以下, FA-15%)、高炉スラグ微粉末では 45% (以下, BFS-45%) とし、それぞれフライアッシュセメント B 種ならびに高炉セメント B 種に相当する。ガラス微粉末の使用量はこれらよりも少なく、セメントの 5% または 15% の 2 水準とした。

2.2 混和材の種類ならびに特徴

使用した混和材の種類と物性値を表-2 にまとめる。粒度分布の中央値に相当するメディアン径 (以下, D₅₀) ならびに比表面積と、蛍光 X 線分析により調べた化学組成をそれぞれ記している。

表-1 試験水準と混和材の種類ならびに使用量

No.	水準名	混和材	
		種類	量 (C×%)
1	Plain*	なし	—
2	FA-15%	フライアッシュ (FA)	15
3	BFS-45%	高炉スラグ微粉末 (BFS)	45
4	G1-5%	ガラス微粉末 (G1)	5
5	G1-15%	ガラス微粉末 (G1)	15
6	G2-5%*	ガラス微粉末 (G2)	5
7	G2-15%	ガラス微粉末 (G2)	15
8	G3-5%*	ガラス微粉末 (G3)	5
9	G3-15%	ガラス微粉末 (G3)	15
10	G3S-5%	ガラス微粉末 (G3S)	5
11	G3S-15%	ガラス微粉末 (G3S)	15
12	G3L-5%	ガラス微粉末 (G3L)	5
13	G3L-15%	ガラス微粉末 (G3L)	15

*印の水準では、モルタルバー法試験完了後に顕微鏡観察を実施

*1 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発推進部 高機能コンクリートチーム 研究員 修(工) (正会員)

*2 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発推進部 高機能コンクリートチーム 主任研究員 博(工) (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 研究開発推進部 高機能コンクリートチーム リーダー 博(工) (正会員)

表-2 フライアッシュ、高炉スラグ微粉末およびガラス微粉末の諸物性と組成

種類	比表面積 (m ² /g)	D ₅₀ (μm)	密度 (g/cm ³)	化学組成 (wt.%)											R ₂ O* ³
				ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	BaO	B ₂ O ₃	
FA	0.35* ¹	-	2.19	0.90	65.3	24.2	3.10	1.50	0.80	0.2	0.50	1.10	0	0	1.23
BFS	0.44* ¹	-	2.90	0.28	32.6	13.6	0.52	43.2	5.66	2.14	0.19	0.24	0	0	0.29
G1	3.15* ²	2.91	3.05	0.67	44.8	0.06	0.01	12.1	0.10	0.03	0.26	0	24.8	9.02	0.26
G2	6.94* ²	1.96	2.44	1.26	44.0	20.4	0.01	8.16	0.04	0	0.01	0	0	23.9	0.01
G3	6.08* ²	4.12	2.19	1.74	77.2	0.23	0.01	0.01	0.11	0	0.01	1.96	0	18.7	1.30
G3S	18.8* ²	0.91	2.21	4.07	75.1	0.38	0.01	0.01	0.10	0.01	0.01	1.96	0	17.8	1.30
G3L	2.36* ²	11.1	2.19	1.26	77.6	0.27	0.01	0.01	0.10	0	0.00	2.01	0.02	18.7	1.33

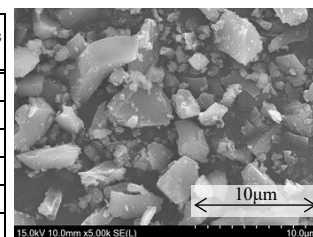


図-1 G3のSEM観察画像

*¹: プレーン比表面積, *²: BET比表面積, *³: 全アルカリ量 R₂O= Na₂O+0.658K₂O

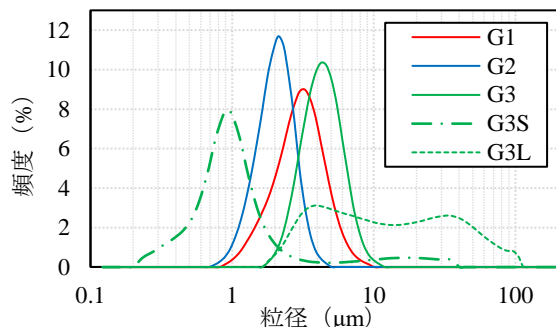


図-2 ガラス微粉末の粒度分布

いずれのガラス微粉末も化学組成は質量比で半分以上が SiO₂と B₂O₃で構成されており、ガラスの種類としてはホウケイ酸ガラスである。G1, G2, G3の3種類は粒度が同程度 (D₅₀が1.96~4.12μm) であるものの、化学組成は異なっている。例えば、G3では80%弱の大部分が SiO₂であるのに対して、G1やG2では SiO₂量が少なく、その代わりにG1ではCaOやBaOが、G2ではAl₂O₃やCaOが多く含まれている。また、粒度による影響を調べるため、G3と化学組成は同様で粒径が異なるG3SとG3Lを用意した。G3SのD₅₀は0.91μmと非常に小さく、G3LのD₅₀は11.1μmと粗大な粒子となっている。

ガラス微粉末G3を例に、走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察した画像を図-1に示す。粒子の形状は角ばっており、大小の粒子が混在していることがわかる。また、レーザー回折法により求めたガラス微粉末の粒度分布は図-2に示すとおりである。G1, G2およびG3の粒度分布は左右対称でシャープな形状であるのに対して、G3SやG3Lでは粒径の分布幅が広くなり、G3Lでは粒度のピークが2箇所 (粒径4μmと30μmの近傍) 存在することなどがわかる。

比較として用いた混和材は、フライアッシュ II 種 (JIS A 6201) と高炉スラグ微粉末 4000 (JIS A 6206) である。これらはセメントとほぼ同じオーダーの粒径であり、ガラス微粉末よりも比表面積は小さくなっている。

2.3 混和材以外の使用材料

前述した混和材のほかに使用した材料は表-3に示すとおりである。反応性骨材には化学法 (JIS A 1145) で「無害でない」と判定される両輝石安山岩を用意した。これを粗砕してモルタルバー法 (JIS A 1146) に定める粒度に調整し、細骨材として用いた。

表-3 使用材料の概要

分類	種類	物性等
水	練混ぜ水	上水道水
粉体	普通ポルトランドセメント	密度 3.15g/cm ³ , プレーン比表面積 3,100cm ² /g, 全アルカリ量 (R ₂ O) 0.53%
	混和材	詳細は表-2に示すとおり
細骨材	反応性骨材	両輝石安山岩砕砂, 表乾密度 2.67g/cm ³ , 吸水率 1.82%, S _c * 569mmol/L, R _c * 150mmol/L
アルカリ溶液	水酸化ナトリウム水溶液	試薬, 1mol/L水溶液

*化学法 (JIS A 1145), S_c: 溶解シリカ量, R_c: アルカリ濃度減少量

2.4 配合ならびに作製方法

モルタルの配合は、質量比で粉体 (セメントと混和材の和) 1, 水 0.5, 細骨材 2.25 とした。セメントの全アルカリが Na₂O 換算で 1.2% になるよう水酸化ナトリウム水溶液にて調整した。ホバートミキサで練混ぜを行い、所定の型枠にモルタルを打ち込み、材齢 1 日で脱型した。

2.5 試験項目ならびに測定方法

(1) 膨張量試験

寸法 40×40×160mm の供試体を用いて、JIS A 1146 に準拠してモルタルの膨張量を測定した。脱型直後 (材齢 1 日) に長さの初期値を記録したのち、恒温恒湿槽を用いて温度 40℃, 相対湿度 95% 以上の条件にて養生 (以下, ASR 促進養生) し、材齢 182 日まで試験した。

(2) 圧縮強度試験

モルタルの力学特性として、寸法 φ50×100mm の供試体を用いて圧縮強度を測定した。養生条件は 2 通りとし、ASR が促進されにくい条件である水中養生 (20℃, 28 日) と、膨張量試験と同じ条件である ASR 促進養生 (91 日) で圧縮強度試験を行った。なお、ASR 促進養生を行った供試体では、表面に検長 30mm のひずみゲージを貼付してヤング係数 (静弾性係数) を求めた。

3. 試験結果

3.1 試験結果の概要

圧縮強度試験と膨張量試験の結果を表-4にまとめる。膨張量試験では材齢 182 日時点における膨張量から、JIS A 1146 の基準により、膨張量が 1000×10⁻⁶未満の場合には「無害」、1000×10⁻⁶以上の場合には「無害でない」と判定した。ただし、JIS における判定基準は使用骨材が無害かどうかを判定するものであるから、モルタルの膨張量

を評価した本検討では参考として記している。

3.2 膨張特性

ASR 促進養生中における膨張量の経時変化を 図-3 に示す。混和材を使用していない Plain では材齢 14 日から急激に膨張し、材齢 182 日時点での膨張量は 3500×10^{-6} 程度であった。一般的な混和材を用いた FA-15% や BFS-45% では、試験完了までほとんど膨張していない。

ガラス微粉末の場合、その種類によって ASR 抑制効果が異なり、材齢 182 日における膨張量とガラス微粉末の使用量は 図-4 に示す関係になる。図中には JIS A 1146 による判定結果も併記しているが、いずれのガラス微粉末でも、使用量を 15% とした場合はほとんど膨張しておらず、「無害」と判定されるわずかな膨張量であった。ガラス微粉末の種類によらず、セメントの 15% 程度を内割置換すれば ASR を十分に抑制している。粒度が同程度の G1, G2 および G3 について、使用量をセメントの内割で 5% としたとき、G3 を用いた場合 (G3-5%) のみ膨張しなかった。G3 は SiO_2 を多く含むことから、このような化学組成のガラス微粉末が膨張抑制に有効なことが示唆される。また、化学組成は同様で粒度の異なる G3, G3S および G3L を用いた場合で比較すると、使用量が 5% のとき、G3L を用いたもの (G3L-5%) のみ「無害でない」と判定されるような大きい膨張を示した。G3L のように粒径が大きいガラス微粉末では反応に寄与できる表面積が減少し、ASR 抑制効果も低減したものと考える。

3.3 圧縮強度ならびにヤング係数

表-4 より水中養生を行った場合の圧縮強度を比較すると、G3L-15% 以外のガラス微粉末を添加した水準では Plain よりも圧縮強度が高くなっている。ガラス微粉末が反応することで硬化体が緻密化したことが示唆される。圧縮強度の向上効果は G3 を用いた場合に最も優れており、前述した ASR 抑制の向上効果と合致する結果であった。また、使用量をセメントの内割 15% としたとき、FA-

表-4 モルタル試験結果の概要

No.	水準	膨張量試験		圧縮強度試験		
		ASR 促進養生 182 日	判定*	水中養生 28 日	ASR 促進養生 91 日	
		ϵ_c ($\times 10^{-6}$)		f'_c (N/mm^2)	f'_c (N/mm^2)	E_c (kN/mm^2)
1	Plain	3480	無害でない	31.6	36.3	18.7
2	FA-15%	190	無害	36.3	54.0	29.7
3	BFS-45%	-60	無害	30.2	44.5	30.7
4	G1-5%	1890	無害でない	40.5	42.9	20.2
5	G1-15%	60	無害	43.4	50.2	26.0
6	G2-5%	1700	無害でない	43.5	44.7	24.1
7	G2-15%	-140	無害	50.1	52.9	28.6
8	G3-5%	200	無害	45.8	56.0	28.0
9	G3-15%	-50	無害	54.4	62.7	29.4
10	G3S-5%	580	無害	42.2	51.5	32.0
11	G3S-15%	-230	無害	52.7	58.6	35.1
12	G3L-5%	2070	無害でない	33.0	41.6	24.1
13	G3L-15%	50	無害	30.4	42.2	34.8

f'_c : 圧縮強度, E_c : ヤング係数, ϵ_c : 膨張量, *: JIS A 1146 による

15% と比べると、ガラス微粉末を用いた方が圧縮強度は高い傾向であり、例えば G3-15% の圧縮強度は FA-15% と比べて 50% 高くなった。ガラス微粉末はフライアッシュや高炉スラグ微粉末よりも微細であり、反応性も高いものと考えられる。そのため、ガラス微粉末を用いた場合には、初期強度が低下する懸念がないものとする。

ASR 促進養生 91 日において取得した圧縮強度とヤング係数は、どちらも Plain が最も低く、G3-15% で最も高い結果となった。この時点における膨張量とヤング係数の関係は 図-5 に示すとおりであるが、膨張量が大きな水準であるほどヤング係数は小さくなる傾向を示した。ASR により過大な膨張を生じると、モルタル内部で微細

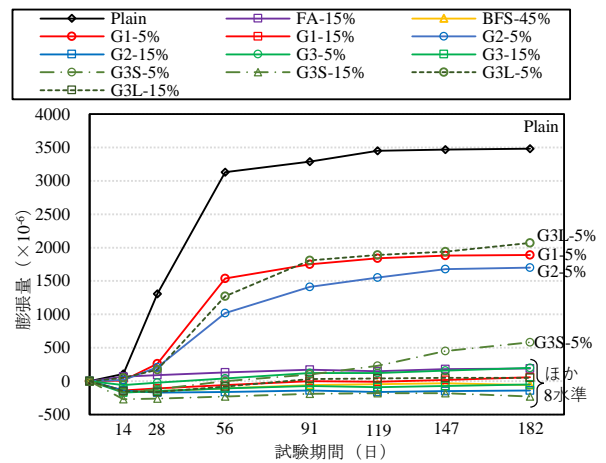


図-3 ASR 膨張量の経時変化

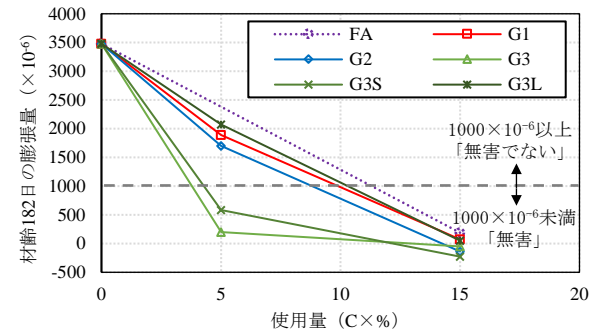


図-4 ガラス微粉末の使用量と膨張量の関係 (参考として FA も併記)

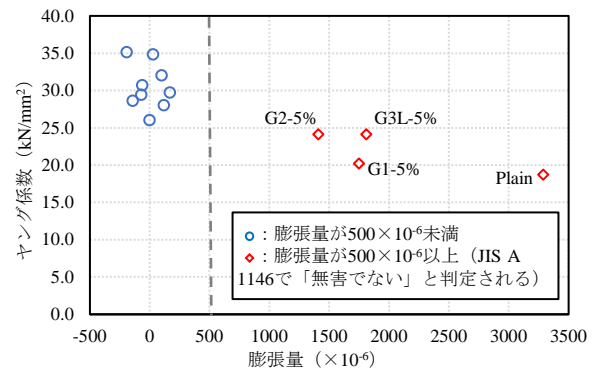


図-5 ASR 促進養生 91 日における膨張量とヤング係数の関係

なひび割れや損傷が蓄積し、剛性が低下するためと思われる。ガラス微粉末を用いた場合は、前述したように硬化体が緻密化するとともに、ASRによる損傷を防ぐことで力学特性が改善したものと考える。

3.4 SiO₂量の影響

前節までの試験結果より、ガラス微粉末 G3 を用いた場合に ASR 抑制効果が最も高いことを確認し、SiO₂量の多いものほど有効であると考えられた。そこで、モルタル中で混和材が含む SiO₂の質量分率を計算し、膨張量との関係を比較した。SiO₂の質量分率 W は次の式(1)を用いて算出した。

$$W = B \times M \times S \quad (1)$$

ここに、 W : 配合中で混和材に含まれる SiO₂の質量分率、 B : 配合における粉体の質量分率、 M : 混和材のセメントに対する置換率、 S : 使用した混和材の化学組成における SiO₂の質量分率

材齢 182 日の膨張量と W を比較したものが 図-6 である。おおよそ SiO₂の質量分率が大きいほど膨張量は低減し、特に SiO₂量が 1% を超える場合はモルタルバー法試験において「無害」と判定される。ただし、G3L-5%のみ、

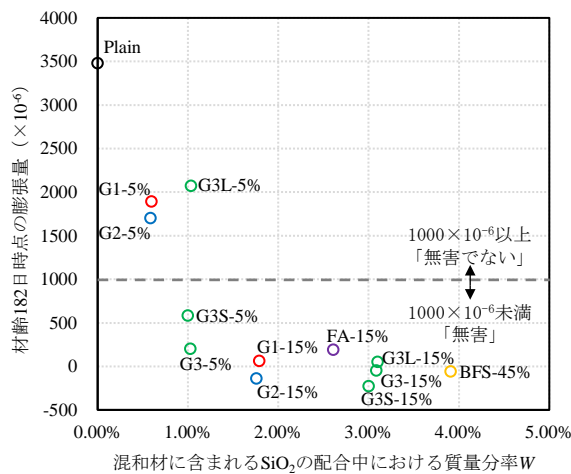
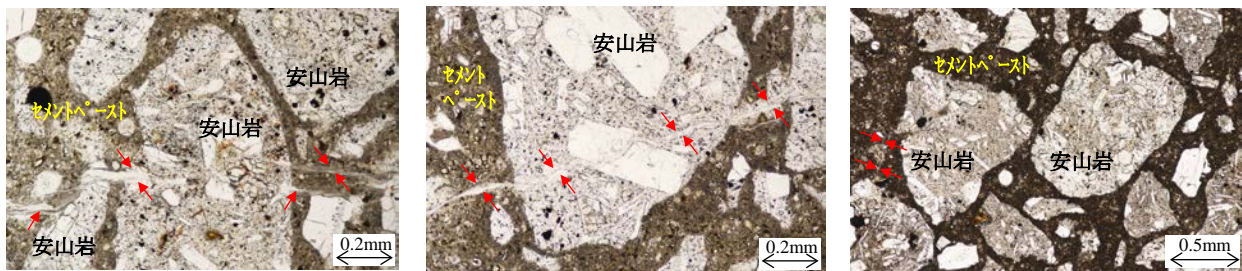


図-6 混和材に含まれる SiO₂の質量分率と膨張量

表-6 偏光顕微鏡観察に基づく ASR 劣化グレードの判定基準 (文献⁷⁾に基づく)

グレード	劣化の程度 (劣化過程)	観察される内容
1	軽微 (潜伏期)	骨材に初期の反応 (反応リム・ゲルの取り巻き) のみが認められる
2	中程度 (進展期・加速期)	ひび割れが多数の骨材内に生じ、骨材からセメントペーストに向かって進展している
3	顕著 (加速期・劣化期)	セメントペースト内に密集したひび割れの形成や、そのひび割れに沿った気泡内へのゲルの沈殿が頻繁に見られる



(a) Plain (赤矢印はひび割れ)

(b) G2-5% (赤矢印はひび割れ)

(c) G3-5%

図-7 モルタルバー法試験完了後における偏光顕微鏡 (単ニコル) による観察画像の例

SiO₂の質量分率が 1% 以上であるにも関わらず「無害でない」と判定される膨張を示したが、これは先述したように粒子が粗大であり、反応に十分寄与しなかったためと考える。ガラス微粉末のうち SiO₂含有量の低い G1 や G2 を使用する場合、セメントに対して内割で 5% ほど使用すると混和材が含む SiO₂は 0.5% 程度であるとともに、「無害でない」と判定される膨張量であった。これに対して置換率を 15% にすることで SiO₂量は 1.8% 程度に増加すると同時に、モルタルの膨張量も「無害」とされる範囲まで低減されている。一般的にフライアッシュに含まれる SiO₂量は 60% 程度⁵⁾、高炉スラグ微粉末では 30% 程度⁶⁾である。G3 のようなガラス微粉末はこれらよりも SiO₂を多く含み、なおかつ微細で比表面積も大きいことから、セメントに対して内割で 5% の少量添加でも ASR の抑制効果が十分に得られたものと考察する。

4. 顕微観察

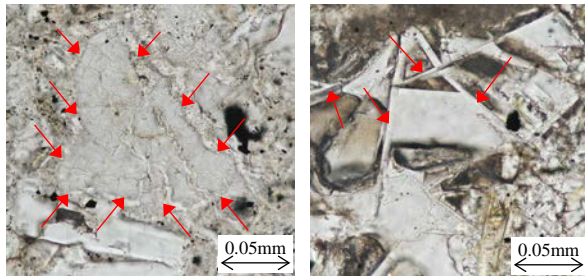
4.1 測定対象と観察の概要

前節で試験した 13 水準のうち、Plain, G2-5% および G3-5% を対象として、顕微観察を行うことで ASR による劣化の程度を診断するとともに、ASR 抑制のメカニズムについて考察した。試料は材齢 182 日までの膨張量測定が完了したモルタルバーから採取した。

4.2 観察方法

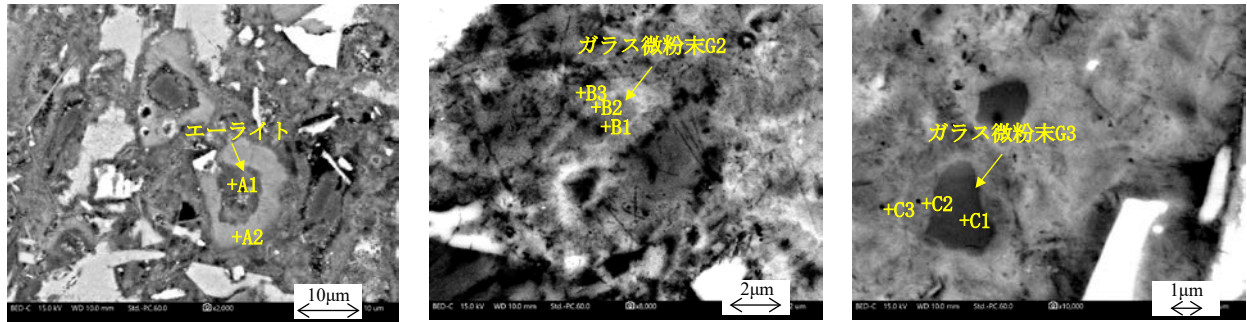
(1) 偏光顕微鏡での観察ならびに劣化グレード判定

モルタルバーの中心部から試料を採取し、厚さ約 20 μ m の研磨薄片を作製して偏光顕微鏡で観察した。ASR の発生状態は Katayama et al.⁷⁾ が提案する手法で判定した。すなわち、ASR の進行段階を、i) 骨材の反応リムの形成、ii) 骨材周辺のゾル・ゲルの取り巻き、iii) 骨材内のひび割れ形成・ゲル充填、iv) 骨材を取り巻くセメントペーストへのひび割れ進展・ゲル充填、v) 骨材から離れたセメントペーストの気泡内へのゲルの頻繁な沈殿、の 5 段階に分けて評価した。この診断結果を表-6 に示す観



(a) クリストバライト (b) トリディマイト

図-8 偏光顕微鏡により認められた反応性鉱物 (図中に赤矢印で示す)



(a) Plain (b) G2-5% (c) G3-5%

図-9 エーライトまたはガラス微粉末の周辺を対象とした反射電子像ならびに EDS 分析箇所

点から整理し、ASR による劣化のグレードを 3 段階（軽微・中程度・顕著）で判定した。

(2) 反射電子像観察ならびに EDS 定量分析

偏光顕微鏡により観察を行った鏡面研磨薄片に炭素蒸着を施し、電子顕微鏡にて反射電子像を観察した。また、観察視野において、電子顕微鏡に付属のエネルギー分散型 X 線分析装置を使用し、EDS 定量分析を行った。

4.3 偏光顕微鏡による ASR 進行状況の観察

各水準における偏光顕微鏡による観察画像の代表例を図-7 に、反応性鉱物の観察例を図-8 にそれぞれ示す。安山岩が含む反応性鉱物には、急速膨張性を示すとされるクリストバライトやトリディマイトが認められた。

ASR による劣化の進行程度に関して、混和材を使用していない Plain では、骨材粒子からセメントペーストへ進展したひび割れが認められ、ひび割れ内部には ASR ゲルが充填されていた。ひび割れは高密度に分布し、これに沿ってセメントペーストの気泡内へゲルの沈殿が頻繁に確認された。ガラス微粉末 G2 を 5% 添加した G2-5% でも、骨材からセメントペーストへのひび割れ進展や、ひび割れ内部への ASR ゲルの充填が認められた。ただし、ひび割れの密度は Plain よりも小さく、セメントペースト中の気泡内にみられるゲルの沈殿もわずかであったことから、ASR による劣化の程度は Plain よりも小さいと判断できる。つづいてガラス微粉末 G3 を 5% 用いた G3-5% においては、前述した 2 水準と異なり、骨材粒子にはひび割れが認められたが、セメントペーストに進展したひび割れはまれであった。

表-7 偏光顕微鏡の観察結果と文献⁷⁾に基づく判定

水準	ASR 進行段階 →					ASR 劣化 グレード
	i	ii	iii	iv	v	
	骨材			セメントペースト		
	反応 リム	ゲルの滲み ・取巻き	ひび割れ ゲル充填	ひび割れ ゲル充填	気泡 ゲル充填	
Plain	○	◎	◎	◎	○	中程度～顕著 (加速期)
G2-5%	○	◎	◎	◎	+	中程度 (進展期)
G3-5%	○	○	○	+		軽微～中程度 (潜伏期～進展期)

◎：顕著，○：あり，+：微量，空欄：なし

表-8 エーライトまたはガラス微粉末の周辺における Ca/Si モル比 (分析点は図-9 参照)

水準	Plain		G2-5%			G3-5%		
分析点	A1	A2	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Ca/Si 比	1.79	1.81	1.73	2.03	2.11	0.19	1.50	1.49

偏光顕微鏡による観察結果を整理し、各水準での ASR 劣化のグレードを判定したものが表-7 である。ASR による劣化は Plain において中程度と顕著の中間程度と考えられ、劣化過程としては加速期に相当すると判定した。G2-5% の劣化は中程度であり、進展期にあるものと判定した。G3-5% における劣化過程は潜伏期と進展期の中間程度であり、上述したような水準と比べて ASR の進行が大幅に抑制されていることを確認した。

4.4 電子顕微鏡による生成物の観察

図-9 は各水準においてエーライトやガラス微粉末の粒子近傍で取得した反射電子像である。図中には EDS 定量分析を行った箇所を併記しており、定量分析値から求めた反応生成物の Ca/Si 比 (モル比) は表-8 に示すとおりである。Plain ではエーライト粒子の内部と周辺のいずれにおいても Ca/Si 比は 1.80 程度である。ガラス微粉末を用いた場合は、G2-5% ではガラス微粉末の粒子近傍で Plain よりも大きな Ca/Si 比を示した一方で、G3-5% においては低下している。G3 粒子の中心に近い分析点 (C1) では Ca/Si 比が 0.19 と非常に低く、粒子の周辺 (C2, C3) においても 1.50 程度と他の水準よりも小さくなってい

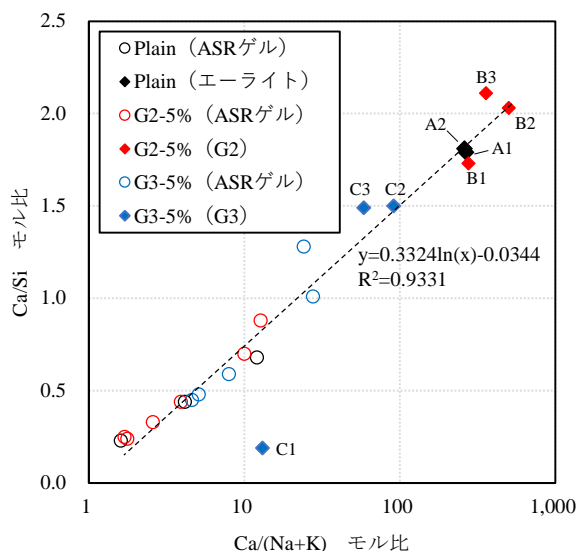


図-10 ASR ゲルならびにガラス微粉末反応物の組成

る。セメント硬化体中に生じる C-S-H (ケイ酸カルシウム水和物) について、Ca/Si 比が低いものはアルカリイオンを吸着することで細孔溶液の pH を低減することが知られており^{2,8)}、ガラス微粉末 G3 を用いた場合に ASR が抑制されたことはこの影響が大きいものと考えられる。SiO₂ 含有量の少ないガラス微粉末 G2 を使用した場合に Ca/Si 比は無添加の Plain よりもむしろ大きくなっていることから、Ca/Si 比を低減するためには SiO₂ を多く含むガラス微粉末が望ましいと思われる。

ASR ゲルの組成変化は Ca/Si のモル比と Ca/(Na+K) のモル比で整理できることが知られている⁹⁾ため、EDS 定量分析の結果から求めた両者の関係を図-10 に示す。分析点は、図-9 に示したエーライトまたはガラス微粉末の周辺ならびに ASR ゲルとし、ASR ゲルについては骨材内部に生じたひび割れからセメントペーストにかけて 10~30 μm 間隔で分析した。図-10 内に近似式を示しているように、Ca/Si 比と Ca/(Na+K) 比の自然対数には良好な相関が認められた。分析点 C1 のみこの関係から逸脱しているが、この点はガラス微粉末 G3 の粒子に近く、上述した Ca/Si 比の低下による影響が強いためと考える。また、ASR ゲル部の Ca/(Na+K) 比は Plain で 1.6~12、G2-5%では 1.7~13 であるのに対し、G3-5%では 4.6~28 と高く、アルカリ量が相対的に少ない。この水準では ASR の進行がわずかであるために骨材からのアルカリ溶出量が少ないことや、ガラス微粉末 G3 の反応によりアルカリが消費された可能性が考えられる。

5. まとめ

- (1) SiO₂ の含有量が多いガラス微粉末を添加することで、モルタルに生じる ASR 膨張量は低減されるとともに圧縮強度は向上した。粒径の大きいガラス微

粉末は反応しにくいいため、この効果は小さくなった。

- (2) 偏光顕微鏡を用いてモルタル内部を観察し、ASR による劣化の程度を診断したところ、混和材を使用していない場合にはセメントペースト部にひび割れが高密度に生じており、加速期に相当する劣化であった。これに対して SiO₂ 含有量の多いガラス微粉末をセメントに対して 5%内割置換したモルタルでは、ASR による劣化が大幅に抑制された。
- (3) SiO₂ 含有量の多いガラス微粉末を用いたモルタルでは硬化体中において、Ca/Si 比が低下した。ガラス微粉末によって ASR が抑制されるメカニズムは、低 Ca/Si 比の C-S-H がアルカリイオンを吸着する効果が大きいものと考えられた。

参考文献

- 1) 国土交通省：アルカリ骨材反応抑制対策（土木構造物）実施要領，2002
- 2) 山本武志，廣永道彦：フライアッシュのアルカリシリカ反応抑制メカニズムに関する実験的検討，電力中央研究所報告，N07016，2007
- 3) 長瀧重義，大賀宏行，井上毅：フライアッシュによるアルカリ骨材反応の膨張抑制効果とそのメカニズム，土木学会論文集，Vol. 414，V-12，pp. 175-184，1990
- 4) 林建佑，河野克哉，山田一夫：反応性骨材の粒径と ASR 膨張の関係，セメント技術大会講演要旨，pp. 226-227，2009
- 5) 山本武志，廣永道彦：フライアッシュのポゾラン反応性を評価するための促進化学試験法（API 法）の適用性の拡張，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30，No. 1，pp. 195-200，2008
- 6) 笠井芳夫・坂井悦郎：新セメント・コンクリート用混和材料，技術書院，2007
- 7) T. Katayama et al. : 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
- 8) S. Y. Hong and F. P. Glasser : Alkali binding in cement pastes Part I. The C-S-H phase, Cement and Concrete Research, Vol. 29, pp. 1893-1903, 1999
- 9) 鳥居和之，山田一夫：コンクリート診断-ASR の的確な診断/抑制対策/岩石学的評価，森北出版，pp. 210-215，2017