

論文 能登半島産安山岩砕石の鉱物質混和材による ASR 抑制効果の検証

西澤 彩*1・蟹谷 真生*2・山戸 博晃*3・鳥居 和之*4

要旨: 本研究は、能登地方の代表的な安山岩砕石に対する鉱物質混和材（フライアッシュ（FA）及び高炉スラグ微粉末（BFS））によるアルカリシリカ反応（ASR）抑制効果の検証を目的としたものであり、安山岩砕石の岩石・鉱物学的特徴を明らかにするとともに、促進モルタルバー法により安山岩砕石の ASR 反応性と偏光顕微鏡による薄片観察より ASR 劣化度を判定した。その結果、能登地方で使用するガラス質安山岩砕石の岩石・鉱物学的特徴（火山ガラスの量）と ASR 試験の判定結果とモルタルバーの膨張量の関係が明らかになり、鉱物質混和材による ASR 抑制効果の検証試験としてデンマーク法が最も適していた。

キーワード: 安山岩砕石, ASR 抑制対策, 鉱物質混和材, 岩石・鉱物学的試験, 促進モルタルバー法

1. はじめに

能登地方には大きな河川がなく、長年にわたり安山岩砕石がコンクリート用骨材として使用されてきた。能登地方の安山岩砕石は、門前で産出するガラス質の安山岩と輪島、珠洲などで産出する結晶質の安山岩に分類される¹⁾。前者は能登有料道路などに使用され、深刻な ASR による劣化が報告されている²⁾。現在、能登地方では安山岩砕石から石灰石砕石に変更する動きもでていますが、輸送経路とコストの関係から能登北部の地域では安山岩砕石を使用せざるを得ない実情がある。

一方、わが国の ASR 抑制対策（JIS A5308（レディミクストコンクリート））は、(1) 化学法（JIS A1145）またはモルタルバー法（JIS A1146）で「無害」と判定された骨材を使用する、(2) コンクリートのアルカリ総量を 3 kg/m^3 以下にする、(3) ASR 抑制効果が認められる混合セメントを使用する、からなっている。能登産の安山岩砕石の ASR 抑制対策との関係をまとめると、(1) については、安山岩砕石の化学法の結果は ASTM C289 で「潜在的有害」の領域に判定されるので、ペシマム混合率を考慮したモルタルバー法の適用が必要になる（しかし、JIS A1146 ではペシマムでの配合は検討されていない）。また、(2) については、ガラス質の安山岩砕石は、含有する火山ガラスから多量のアルカリが溶出することが知られている。このことは、アルカリ総量規制値を遵守していても、長期にわたりアルカリが溶出するために、ASR が発生する可能性があることを示唆している。事実、能登有料道路での深刻な ASR は、 2.4 kg/m^3 程度のアルカリ量で発生していることが報告されている³⁾。以上を踏まえると、ASR 抑制対策としては、(3) がもっとも有効かつ合理的であると判断できる⁴⁾。

北陸地方における混合セメントの利用に関しては、BFS は、日本海側に製鉄所がないために主に北九州から輸送している。その一方で、FA は北陸 3 県に石炭火力発電所が存在する。このため、高品質の FA を地域に安定的に供給できる体制を確立するために、平成 23 年 1 月に産官学が連携による、「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会」が設立された⁴⁾。その活動の一環で、FA 及び BFS の ASR 抑制効果の比較を検討した。

そこで本研究では、能登半島産の代表的な安山岩砕石 3 種の岩石・鉱物学的特徴を各種機器分析により明らかにするとともに、それらの安山岩砕石における鉱物質混和材の ASR 抑制効果を検証した。さらに、促進モルタルバー法の結果を比較することにより、骨材の ASR 試験法の適用性についても検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本研究で使用した 3 種類の安山岩砕石の採取地を図 1 に示す。安山岩砕石は能登半島北部で一般に流通しているものであり、旧門前町産（略号：安山岩 A）、能登町産（略号：安山岩 B）、及び輪島市産（略号：安山岩 C）である。また、モルタルバーの作製に使用したセメントは、普通ポルトランドセメント（密度： 3.16 g/cm^3 、等価アルカリ量：0.55%）である。FA は、七尾大田火力発電所にて製造される分級灰（密度： 2.44 g/cm^3 、等価アルカリ量：1.14%）である。七尾大田火力発電所では、石炭炭種の選択（オーストラリアの歴青炭）とボイラーの燃焼温度の管理により、JIS II 種灰を採取し、さらにそれをサイクロンにより分級することにより、JIS I 種灰相

*1 京都大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)

*2 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)

*3 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 技術官 (正会員)

*4 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 教授 (正会員)

表-1 本研究で使用した鉱物質混和材 (FA 及び BFS) の物理的性質及び化学成分

混和材	密度 (cm ³ /g)	ブレン粉末度 (cm ² /g)	モルタルフロー値 (%)	活性度指数		塩基度 (%)	化学成分					
				材齢28日 (%)	材齢91日 (%)		SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Na ₂ O (%)	K ₂ O (%)
FA	2.44	4870	106	91	99	—	35.35	26.72	9.14	2.51	0.32	1.24
BFS	2.09	4120	101	103	108	0.007	33.14	14.19	0.73	42.96	0.25	0.28

表-2 偏光顕微鏡観察による ASR 劣化度の判定

レベル	ひび割れの発生及び反応状況
I	反応環の形成と反応性骨材粒子からの ASRゲルの析出
II	反応性骨材粒子からのひび割れの発達
III	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(最大ひび割れ幅25μm以下)
IV	連続的なひび割れ網の形成と ASRゲルの気泡への侵入(最大ひび割れ幅25-50μm)
V	連続的なひび割れ網の形成と ASRゲルの気泡への侵入(最大ひび割れ幅50μm以上)

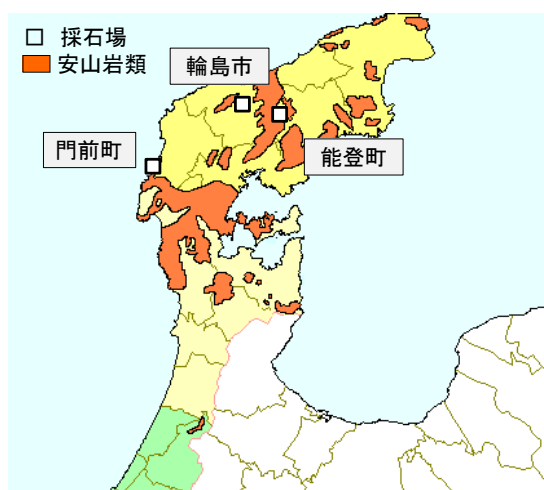


図-1 能登半島における安山岩砕石の岩体分布と採石場の位置

当の高品質フライアッシュを年3万トン製造している。また、BFSは、S社製(密度:2.90g/cm³, 等価アルカリ量:0.43%)であり、ブレン粉末度4000のものを使用した。鉱物質混和材(FA及びBFS)の物理的性質及び化学成分を表-1に示す。

2.2 試験方法

(1) 骨材の岩石・鉱物学的試験

指頭を感じなくなるまで粉碎した試料を使用して、X線回折装置(XRD, CuKα-Ni フィルター, 40kV-20mA)及び蛍光X線回折分析(XRF)により、安山岩砕石の構成鉱物及び化学成分を測定した。さらに、骨材からの薄片試料(厚さ:20μm)を作製し、偏光顕微鏡により安山岩砕石の石基と斑晶に含まれる鉱物を同定した。

(2) 骨材のアルカリシリカ反応性試験

骨材のアルカリシリカ反応性を調べるために、化学法(JIS A1145)及びモルタルバー法(JIS A1146)を実施し

た。また、外部よりアルカリが常に供給され、さらに厳しい条件である ASTM C 1260 (温度 80°C) の 1N・NaOH 溶液に浸せき)及びデンマーク法(温度 50°C)の飽和 NaCl 溶液に浸せき)をそれぞれの規格に準拠して実施した。試験体の大きさはそれぞれ ASTM C1260 (25×25×285mm)、デンマーク法 (40×40×160mm) であり、デンマーク法においては前養生(温度 20°C)の水中養生を 28 日間とした。ASTM C 1260 では 14 日材齢にて 0.1%未満「無害」、0.1-0.2%「無害と有害の両者が存在する(不明確)」, 0.2%以上「有害」と、デンマーク法では 3 ヶ月材齢にて 0.1%未満「無害」、0.1-0.4%「無害と有害の両者が存在する(不明確)」, 0.4%以上「有害」と判定する。FA 及び BFS による ASR 抑制効果は 3 種類のモルタルバー法を比較することにより検討した。FA 及び BFS の置換率は、ASR 抑制効果の推奨値(JIS A5308)を参考にして、それぞれ 15%及び 42%とした。本研究では、混和材無混和のものを OPC, FA を 15%置換したものを FA15%, BFS を 42%置換したものを BFS42%と表記する。

(3) 偏光顕微鏡観察による ASR 劣化度の判定

膨張試験終了後、モルタルバーから薄片研磨試料(厚さ:20μm)を作製し、偏光顕微鏡により骨材周囲の微細な内部組織を観察した。薄片観察により ASR 劣化度を判定する手法が Katayama により提案されている⁵⁾が、それを参考に、本研究で採用した偏光顕微鏡による ASR 劣化度の判定基準を表-2に示す。

3. 実験結果及び考察

3.1 安山岩砕石の岩石・鉱物学的特徴とアルカリシリカ反応性

岩石学的分類に基づくと、能登半島の安山岩砕石は単斜輝石と斜方輝石を含む両輝石安山岩である。これまでの調査より、能登地方の安山岩には、火山ガラスを多く含む、比較的新鮮な安山岩と火山ガラスがモンモリロナイトなどの粘土鉱物に変質した安山岩(スメクタイト化)とが存在することが明らかになっている。3種類の安山岩砕石の鉱物組成の特徴を表-3に示す。安山岩砕石 A(黒色)は、安山岩砕石 B(黒灰色)及び安山岩砕石 C(黒灰色)と比較してシリカ分や鉄分が少なく、アルミナ分が多いという、ガラス質安山岩の特徴が認められた。また、X線回折結果より、安山岩砕石 Aにはガラス相を示すハロー(2θ=18~30°)が存在した。さらに、アルカ

表-3 3種類の安山岩砕石 A, B 及び C の鉱物組成の特徴

骨材	班晶			石基			
	斜長石	単斜(斜方)	輝石	鉄チタン鉱物	火山ガラス	クリストバライト (トリディマイト)	スメクタイト
安山岩A	△	○		△	◎	△	△
安山岩B	◎	○		○	△	△	○
安山岩C	○	○		○	○	△	○

◎：多い，○：中程度，△：少ない

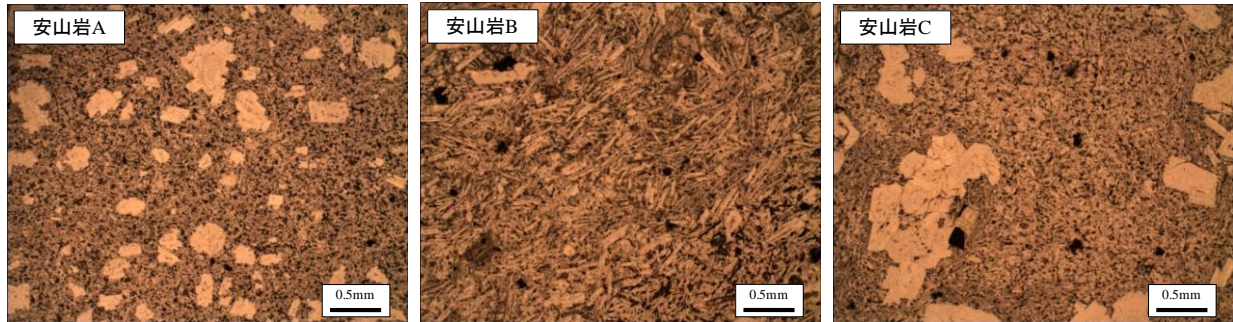


写真-1 3種類の安山岩 A, B 及び C の偏光顕微鏡による薄片観察結果

(石基：火山ガラス，細長い繊維状粒子：斜長石，角ばった粒状粒子：輝石及び角閃石，黒色鉱物：鉄チタン化合物)

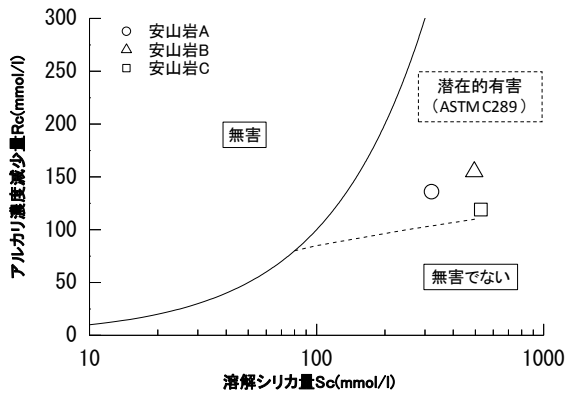


図-2 化学法 (JIS A1154) による判定結果

り分 (Na_2O , K_2O) の種類とその量も安山岩砕石 A と安山岩砕石 B, 安山岩砕石 C とで相違した。以上より, 安山岩砕石のガラス量は, 安山岩砕石 B < 安山岩砕石 C < 安山岩砕石 A の順で増大しているものと推定できた。

安山岩砕石の偏光顕微鏡による薄片観察の結果を写真-1 に示す。安山岩砕石 A は班晶が細かく, 輝石や角閃石を埋めるガラス組織が全体的に均一であることが観察された。また, ASR 反応性を示すシリカ鉱物であるクリストバライト (トリディマイト) は同定されず, 火山ガラスが主要な反応性鉱物であることが判明した。これらは能登地方で産出される安山岩の鉱物的な特徴の 1 つであり, 火山ガラスの反応過程でアルカリが溶出するという性質がある²⁾。一方, 安山岩砕石 B には斜長石や磁鉄鉱が多く含まれており, ガラス相の量が減少するとともに, 空隙にモンモリロナイトの生成が認められた。安山岩砕石 C は安山岩砕石 A と安山岩砕石 B の中間的な鉱物組成であると判断できる。

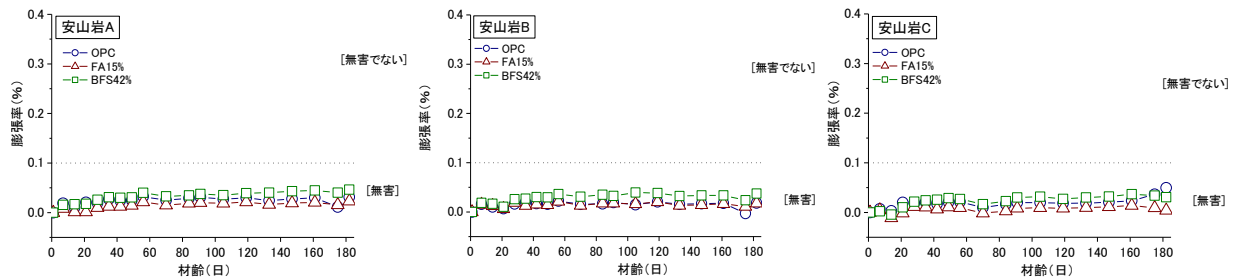
化学法 (JIS A1145) による安山岩砕石の判定結果を図

2 に示す。3種類の安山岩砕石の Sc/Rc の値は 2.36~4.45 であり, JIS A1145 で「無害でない」, ASTM C289 で「潜在的有害」と判定された。また, 安山岩砕石 A は安山岩砕石 B 及び安山岩砕石 C と比較して溶解シリカ量が減少しているが, 安山岩砕石のガラス相は, クリストバライト (トリディマイト) のようなシリカ鉱物と異なり, 含有するアルカリの影響で反応過程が複雑になる。このため, 化学法における溶解シリカ量 (Sc) や溶解シリカ量 / アルカリ濃度減少量比 (Sc/Rc) と骨材の火山ガラス相の量の大小とは必ずしも一致しないものと推定された。

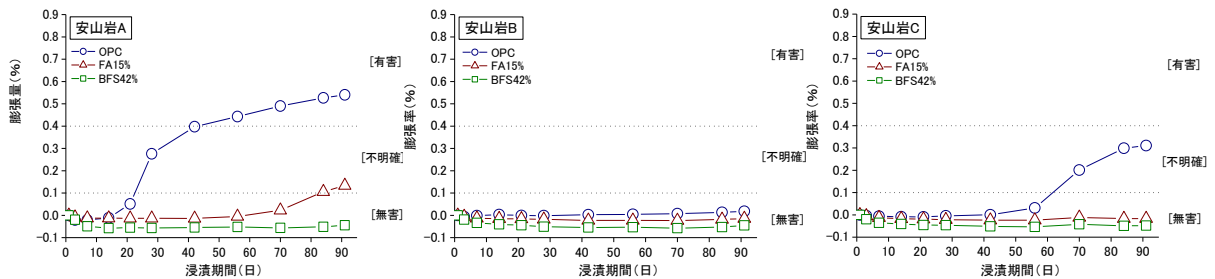
3.2 モルタルパー法によるフライアッシュ及び高炉スラグ微粉末の ASR 抑制効果の評価

(1) JIS A1146 による評価

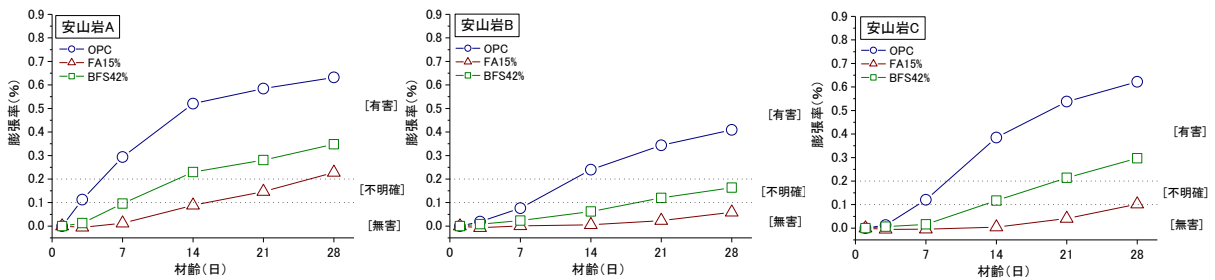
能登産の安山岩砕石は, 化学法により「無害でない」と判定されるので, 通常, モルタルパー法により判定されてきた。石川県生コンクリート工業組合でのモルタルパー法の試験結果を見ると, 近年, モルタルパー法の膨張率は最大でも 0.1% を少し超える程度であり, 「無害でない」と判定されるものが減少している。これは砕石場で安山岩の採取が選別されてきたことによるものである。本研究で使用した安山岩砕石のモルタルパー (JIS A1146) の膨張挙動を図-3 (a) に示す。3種類の安山岩砕石の膨張率は 6 カ月材齢で最大が 0.05% 程度であり, いずれも顕著な膨張を示していない。JIS A1146 では, アルカリ量はセメントの 1.2% に固定されており, 安山岩砕石中の火山ガラス相の ASR を発生させるのにアルカリ量が不足していることが想定される。さらに, モンモリロナイトなどの粘土鉱物がアルカリを吸着することの影響も考えられる。以上より, JIS A1146 では ASR 抑制効



(a) JIS A1146



(b) デンマーク法



(c) ASTM C1260

図-3 3種類の促進モルタルバー法によるFA含有モルタル膨張挙動の検討結果

果の評価への適用が困難であった。

(2) デンマーク法による評価

モルタルバー（デンマーク法）の膨張挙動を図-3 (b) に示す。安山岩砕石 A (OPC) は材齢 14 日以後に膨張が発生し、材齢 91 日の膨張率が 0.5% を超えて、「有害」と判定された。それに対して、安山岩砕石 A (FA15%) は材齢 56 日以後に徐々に膨張し、「不明確」と判定された。また、安山岩砕石 A (BFS42%) はいずれも膨張が発生せず、すべて「無害」と判定された。さらに、安山岩砕石 C (OPC) は材齢 56 日以後に膨張が始まり、「不明確」と判定されたが、FA15%及び BFS42%は膨張が発生しなかった。また、外部から十分なアルカリが常に供給される環境下であるため、モンモリロナイトのアルカリ吸着によるアルカリの減少もなく、火山ガラスが反応するのに十分なアルカリ環境である。さらに、安山岩砕石の反応性の大小や FA 及び BFS の添加による抑制効果が明確に反映されており、デンマーク法は ASR 抑制効果の評価への適用が有効であった⁶⁾。

(3) ASTM C1260 による評価

モルタルバー（ASTM C1260）の膨張挙動を図-3 (c) に示す。3 種類の安山岩砕石 (OPC) の膨張率は初期材

齢より直線的に増大しており、いずれも「有害」と判定された。安山岩砕石の材齢 14 日の膨張率は安山岩砕石 B (0.24%) < 安山岩砕石 C (0.39%) < 安山岩砕石 A (0.52%) の順に増大しており、安山岩砕石の反応性（火山ガラスの量）とほぼ一致していた。一方、すべての安山岩砕石にて、BFS42%は FA15%よりもモルタルバーの膨張率が大きくなる傾向にあり、材齢 14 日の膨張率が 0.12% を超えて、「有害」と判定されるものもあった。この結果はデンマーク法による評価とは一致しなかった。

3.3 偏光顕微鏡観察による促進モルタルバー法の ASR 劣化度の判定

促進モルタルバー試験の終了後にモルタルバーから切り出した断片（薄片研磨試料）の偏光顕微鏡による観察結果と ASR 劣化度の判定一覧を写真-2 及び表-4 に示す。偏光顕微鏡による ASR 劣化度の判定結果と促進モルタルバー法の最終膨張率はよく一致していた。すなわち、ASTM C1260 では、大きな膨張が発生し、「有害」と判定された安山岩砕石 A (OPC, ASR レベル: V) では、骨材内に大きなひび割れ（幅 100 μ m）が観察され、骨材からセメントペーストに連続的なひび割れ網が形成されていた。それに対して、FA15% (ASR レベル: III) 及び

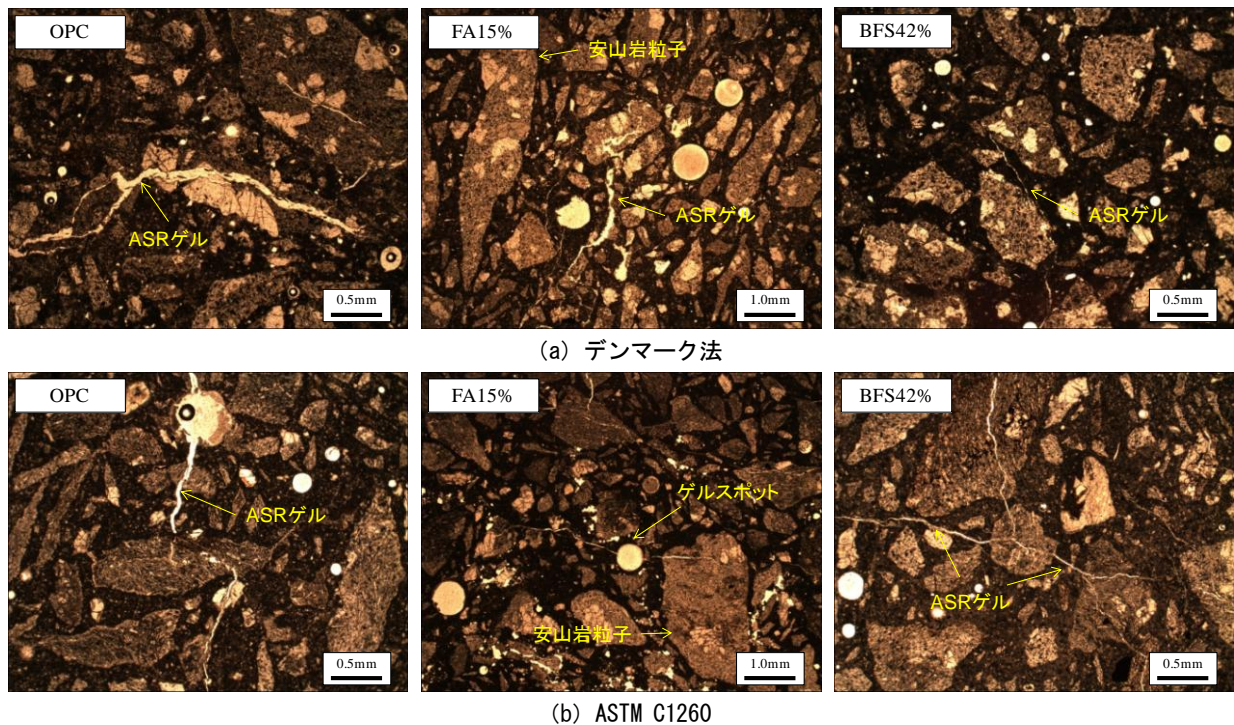


写真-2 促進モルタルバー試験終了後のFA含有モルタルの偏光顕微鏡による薄片観察の結果

BFS42% (ASR レベル:Ⅳ) ではひび割れの幅が細くなり、ひび割れ密度も減少していた。また、安山岩碎石 C (OPC, ASR レベル:Ⅴ) についても同様の結果が認められた。一方、安山岩碎石 B (OPC, ASR レベル:Ⅳ) では、安山岩碎石 A, C に比べて全体に膨張率が低減されていたので、内部組織の微細なひび割れの発生も抑制されていた。しかし、ASTM C1260 では断面が 25×25mm と小さいため、早期に浸透した NaOH 溶液により骨材粒子全体の激しい溶解と、ASR が生じているのが観察され、各試験体間の ASR 劣化度の相違が明確でなかった。一方、デンマーク法では、安山岩の種類による ASR 劣化度の相違がより明確になった。すなわち、火山ガラスの反応により膨張が発生した安山岩碎石 A (OPC, ASR レベル:Ⅴ) 及び安山岩碎石 C (OPC, ASR レベル:Ⅳ) では、40×40mm の断面中心まで塩分が浸透 (0.1N の硝酸銀水溶液を噴霧により確認) しており、ASTM C1260 と同程度の ASR 劣化度が発生していた。それに対して、安山岩碎石 B (OPC, ASR レベル:Ⅰ) は骨材の粒子に軽微な反応の痕跡が観察される程度であった。FA15%及び BFS42%に関しては、安山岩碎石 A の FA15%のみが膨張した。試験が終了した時点で中心部の 10mm 程度は塩分が浸透しておらず、酢酸ウラニル蛍光法でもこの部分には蛍光発色が観察されなかった。今回の測定では、前養生 (28 日間の水中養生) 後に飽和 NaCl 溶液に浸漬しており、FA15%や BFS42%では組織の緻密化による塩分浸透の抑制が ASR による膨張率の低減に現れていることが判明した。

3.4 各種モルタルバー法による総合判定と各種骨材の ASR 反応性試験法の適用性

各種モルタルバー法の結果より、各骨材の ASR 反応性は、安山岩 B<安山岩 C<安山岩 A の順番で高くなるといえる。これは 3.1 で述べた火山ガラス量の大小と一致していることが分かる。促進モルタルバー法の特徴を図-4 にまとめる。骨材の ASR 試験では、試験の信頼性や迅速性、安全性とともに、実構造物での ASR 発生の有無との対応が最も重要になる。このことに関して、安山岩碎石 A は能登有料道路などで、安山岩碎石 C は奥能登の国道 249 号などで ASR の発生が知られているが、安山岩碎石 B を使用した構造物での ASR 発生は不明である²³⁾。骨材の ASR 試験にはオールマイティなものではなく、骨材の反応性鉱物との関係からそれぞれの試験法の適合性が議論されている⁷⁾。各種モルタルバー法の結果において、JIS A1146 では、モルタルバーの膨張率が小さく、骨材の反応性が的確に評価できていない。一方デンマーク法及び ASTM C1260 では、骨材の反応性が明確に評価できる。この両者の促進モルタルバー法 (デンマーク法と ASTM C1260) の膨張率の比較を図-5 に示す。判定基準の材齢がそれぞれ 14 日と 91 日と相違するが、両者の間には良好な関係が認められる。しかし、デンマーク法では、火山ガラスの含有量により ASR 反応性が明確に相違しており、また偏光顕微鏡による観察結果からも火山ガラスが主に反応している。能登産の安山岩碎石にはクリストバライト (トリダイマイト) が含まれておらず、火山ガラスが主要な反応

表-4 偏光顕微鏡観察による ASR 劣化度の判定結果

骨材	試験法	OPC	FA15%	BFS42%
安山岩A	JIS A1146	*	*	*
	デンマーク法	V	III	II
	ASTM法	V	IV	IV
安山岩B	JIS A1147	*	*	*
	デンマーク法	II	I	*
	ASTM法	IV	III	III
安山岩C	JIS A1147	*	*	*
	デンマーク法	IV	*	*
	ASTM法	V	III	III

*:ASRによるひび割れや反応環が観察されない

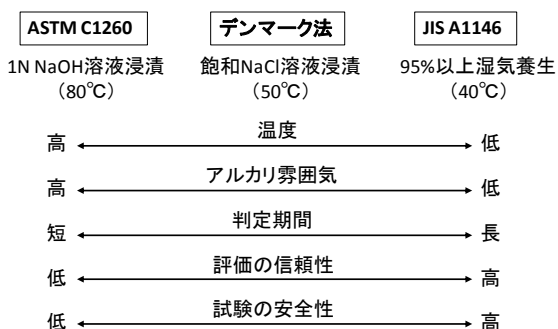


図-4 促進モルタルバー法による ASR 判定の特徴

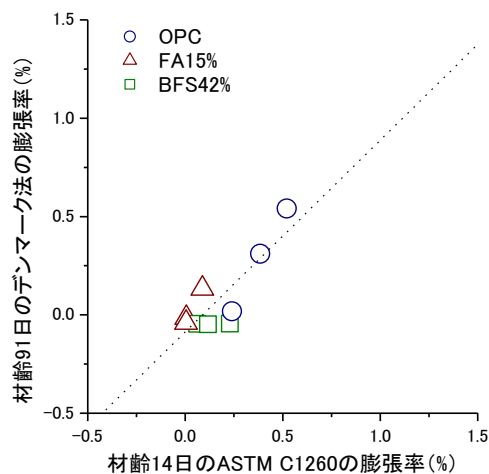


図-5 促進モルタルバー法（デンマーク法と ASTM C1260）の膨張率の比較

性鉱物であることから判断すると、デンマーク法が骨材の ASR 判定に最も適していると考えられた。

4. まとめ

能登産の安山岩砕石 3 種類の岩石・鉱物学的性質及びそれらの鉱物質混和材（FA 及び BFS）の ASR 抑制効果を検討した結果をまとめると以下ようになる。

(1) 能登産安山岩砕石は、採取位置により岩石・鉱物学的性質（火山ガラスの量）が大きく異なった。すなわち、安山岩砕石 A は火山ガラス相が多いのに対し

て、安山岩砕石 B, C は火山ガラス相が少なかった。

(2) 化学法（JIS A1145）の結果より、能登産の安山岩砕石はいずれも「無害でない」と判定され、ASTM C289 の「潜在的有害」の領域にプロットされた。

(3) モルタルバー法（JIS A1146）では、3 種類の安山岩砕石はいずれも膨張が発生しなかった。それに対して、デンマーク法や ASTM C1260 では、安山岩砕石の火山ガラス相の量との関係から、安山岩 B < 安山岩 C < 安山岩 A の順番で膨張量が増大した。

(4) デンマーク法及び ASTM C1260 の結果より、FA15%、BFS42% は長期にわたり ASR による膨張を抑制することができた。また、偏光顕微鏡による薄片観察の結果より、モルタルの最終膨張量と ASR 劣化度の判定結果とはよく一致していた。

(5) 能登産の安山岩砕石に対する ASR 抑制効果の検証試験としては、デンマーク法が適していた。

謝辞：本研究は、産官学連携による「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会」の一環として実施したものであり、ご協力いただいた関係者各位に深く謝意を表する。

参考文献

- 鳥居和之, 野村昌弘, 本田貴子: 北陸地方の反応性骨材の岩石学的特徴と骨材のアルカリシリカ反応性試験の適合性, 土木学会論文集, 767, pp.185-197, 2004
- 湊俊彦, 鳥居和之: 能登有料道路の ASR 劣化橋梁と反応性骨材の岩石学的特徴, 材料, Vol. 59, No. 10, pp.781-786, 2010
- 鳥居和之, 宮村雅之, 湊俊彦, 西川元気: 能登有料道路の基礎構造物の ASR 劣化とその対策, コンクリート工学年次論文集, 46(4), pp.27-33, 2008
- 鳥居和之: フライアッシュの活用によるコンクリートの高耐久化, 電力土木, No.357, pp.11-15, 2012
- 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
- 川端 雄一郎, 山田 一夫, 松下 博通, 岩石学的分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
- 鳥居和之, アルカリシリカ反応にいかに対応するか: 試験, 診断と対策の課題, セメント・コンクリート, No.696, pp.1-9, 2005