

論文 北陸地方の代表的骨材に対するフライアッシュと高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果の比較検討

中島 隆甫*1・山戸 博晃*2・久司 成利*3・広野 真一*4

要旨：北陸地方には火山岩系の地層が広く分布しており、その地域の骨材が使われたコンクリート構造物にはアルカリシリカ反応が発生し、いまだに収束していない。本研究では、北陸地方の代表的な骨材の岩石学的調査を実施するとともに、骨材のアルカリシリカ反応性を化学法(JIS A1145)にて調べた。さらに、モルタルバー法(JIS A1146)と促進モルタルバー法(ASM C1260)によりフライアッシュと高炉スラグ微粉末によるアルカリシリカ反応の抑制効果を比較検討した。その結果、すべての反応性骨材に対して、普通ポルトランドセメントに対するフライアッシュの 15%置換による ASR 抑制効果の優位性を確認できた。

キーワード：ASR, 分級フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末, 抑制効果, 偏光顕微鏡観察

1. はじめに

北陸地方は、河川産の骨材資源に恵まれた地域である。しかし、北陸地方は火山岩を主体とする地層が分布しており、河川産骨材にはアルカリシリカ反応(以下、ASR)の反応性がある安山岩や流紋岩が含まれている。実際、北陸地方産の骨材が使われたコンクリート構造物において、ASRによる劣化が多数報告されてきた¹⁾。北陸地方の ASR 劣化橋梁の分布状況を図-1 に示す。石川県では能登半島北部で産出される安山岩砕石、富山県と福井県ではグリーンタフが上流域に位置する常願寺川や九頭竜川産の川砂・川砂利が ASR の原因となっている。これらの骨材を使用した ASR 劣化橋梁の代表的な劣化状況を写真-1 に示す。これらの橋梁では、橋脚や橋台に鉄筋切断やコンクリートの剥落などの深刻な ASR 劣化が発生しているのが特徴である。

一方、JIS A5308 による ASR 抑制対策は、アルカリ総量規制、混合セメントの使用と「無害」と判定された骨材の使用が基本となる。しかし、オパールやクリストパライトを含み、ペシマム現象が顕著となる北陸地方の骨材には、アルカリ総量規制(3kg/m³)の適用には限界がある。従って、この地方の ASR 抑制対策としては、混合セメントの使用が最も有効とされている。平成 23 年 1 月に産学官連携で設立された「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」の活動の一環として、七尾大田火力発電所と敦賀火力発電所に分級装置が設置され、地域全域への分級フライアッシュの供給体制が整ってきている⁴⁾。

そこで本研究では、北陸地方の代表的な骨材 7 種類について、反応性骨材の岩石学的特徴とそのアルカリシリ

カ反応性を調べた。また、それらの骨材に対しての鉱物質混和材(分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末)による ASR 抑制効果を 2 種類のモルタルバー試験により比較検討するとともに、試験終了後の薄片の偏光顕微鏡観察により鉱物質混和材による ASR 抑制のメカニズムについて考察した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

2.1.1 使用骨材の岩種と反応性鉱物の特徴

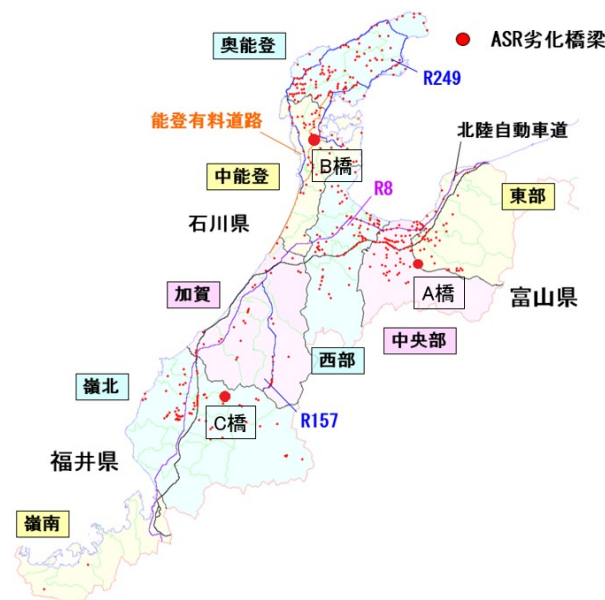


図-1 北陸 3 県における ASR 劣化橋梁の分布状況^{2, 3)}

*1 金沢大学 自然科学研究科環境デザイン学専攻 (学生会員)

*2 金沢大学 理工学域環境デザイン学系主任技術職員 (正会員)

*3 金沢大学 理工学域環境デザイン学系

*4 金沢大学 自然科学研究科環境科学専攻博士後期過程 (学生会員)



(1) RC 橋脚 (A 橋) の梁部



(2) RC 橋脚 (B 橋) の梁部



(3) PC 橋脚 (C 橋) の梁部

写真-1 橋梁、橋脚の ASR によるひび割れの発生状況

本研究に使用した 7 種類の骨材の採取地を図-2 に示す。北陸 3 県のほぼ全域から代表的な骨材として 5 種類の川砂利と 2 種類の砕石を収集した。それらの骨材の産地と物理的性質と岩石・鉱物学的特徴を表-1⁵⁾に示す。砂利 A, 砂利 B および砂利 C は、富山県の代表的な川砂利であり、反応性鉱物としてクリストバライトやトリディマイト、火山ガラスを含むことが知られている。とくに、砂利 B は立山カルデラからの安山岩に、反応性の高いオパールやクリストバライトを含み、その構成割合(30%~40%)は安山岩のペシマム含有率にほぼ一致している⁶⁾。この砂利 B はわが国での有数の反応性骨材であると言える。また、砂利 C は流紋岩質溶結凝灰岩により ASR が発生している。さらに、砂利 D, 砂利 E は、石川県の加賀地方と福井県の嶺北地方で使用されている川砂利であり、クリストバライトやトリディマイト、火山ガラスを含む火山岩が一部に混入している可能性がある。これらの骨材は、石川県や福井県の県境地域にある、白山山麓の国道 157 号(石川県手取川上流)や国道 158 号(福井県九頭竜湖周辺)で深刻な ASR が発生している。一方、砕石 F, 砕石 G はそれぞれ安山岩砕石(反応性鉱物:火山ガラス(多量)と少量のクリストバライトを含有、能登地方の多くで ASR が発生)および硬質砂岩砕石(隠微晶質石英の含有の有無および ASR 発生は未調査)であり、河川産骨材が利用できない能登地方や福井県嶺南地方にてこれまで多く使用されてきた経緯があった。

2.1.2 鉱物質混和材(分級フライアッシュ、高炉スラグ粉末)の物理的・化学的性質

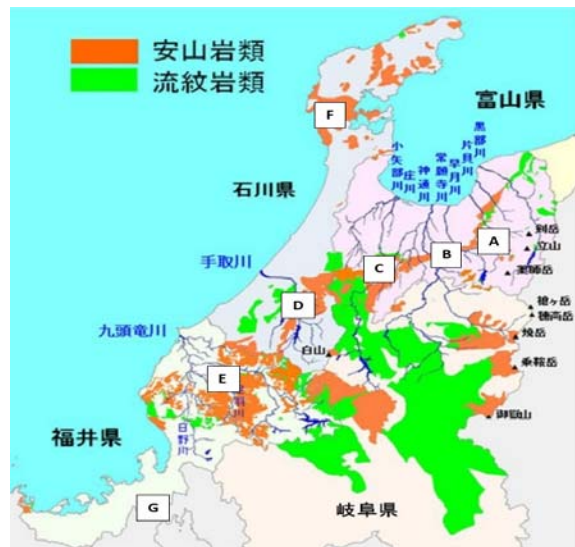


図-2 北陸 3 県における主要河川と反応性骨材の分布図

本研究に使用した分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末の化学成分を表-2 に示す。分級フライアッシュ (JIS A6201 規格の II 種灰相当品) は、「地産地消」と「環境負荷低減」の観点から北陸地域の全域における供給体制を 2 分割にしている。これに従い、石川県と富山県の骨材には七尾大田火力発電所産の分級灰(密度:2.44 g/cm³, ブレーン値 4870 cm²/g)を、福井県の骨材には敦賀火力発電所産の分級灰(密度:2.28g/cm³, ブレーン値 4740cm²/g)をそれぞれ使用することにした。それに対して、高炉スラグ微粉末は JIS A 6206 規格のブレーン 4000 のもの (N 社製, 密度:2.90 g/cm³, ブレーン値 4030 cm²/g)を使用した。

表-1 北陸 3 県の主要な骨材の産地と岩石・鉱物学的特徴

骨材の種類	密度(g/cm ³)	吸水率(%)	岩種	反応性鉱物の特徴
砂利A	2.69	0.78	主要な岩種は花崗岩、閃緑岩などの深成岩	反応性鉱物の有無は未調査
砂利B	2.65	1.45	主要な岩種は火成岩、安山岩を40%程度含む	安山岩中に反応性鉱物:クリストバライト、トリディマイト、オパール、火山ガラス
砂利C	2.61	1.14	多種類の火成岩及び多種類の堆積岩を含む	安山岩中に反応性鉱物:クリストバライト、トリディマイト、火山ガラス(少)
砂利D	2.61	1.83	多種類の火成岩及び多種類の堆積岩を含む	安山岩中に反応性鉱物:クリストバライト、トリディマイト、火山ガラス(少)
砂利E	2.65	1.42	多種類の火成岩及び多種類の堆積岩を含む	安山岩中に反応性鉱物:クリストバライト、トリディマイト、火山ガラス(少)
砕石F	2.65	1.40	安山岩	反応性鉱物:クリストバライト、火山ガラス(多)
砕石G	2.83	0.54	硬質砂岩	反応性鉱物の有無は未調査

表-2 分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末の化学成分(%)およびブレン値(cm²/g)

	Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	ブレン値
七尾大田産分級FA*	2.0	53.6	28.9	6.7	3.2	0.8	1.4	0.1	0.2	0.3	0.7	4870
敦賀産分級FA*	3.2	57.8	26.4	4.5	1.2	0.8	1.2	0.1	0.3	0.5	1.4	4740
BFS	1.0	33.0	13.6	0.1	42.6	5.8	0.6	0.2	3.1	0.2	0.2	4030

*: JIS A6201 規格のⅡ種灰相当品(但し、ブレン値以外はⅠ種灰相当の高品質)

表-3 偏光顕微鏡観察によるASR劣化度の判定

レベル	ひび割れの発生および反応状況
0	ASRによるひび割れや反応環が観察されない
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の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	反応性骨材粒子からのセメントペーストへひび割れの進展(最大ひび割れ幅25-50μm)
V	反応性骨材粒子からのセメントペーストへひび割れの進展(最大ひび割れ幅50μm以上)

また、普通ポルトランドセメント(OPC)に対する分級フライアッシュ(FA)および高炉スラグ微粉末(BFS)は混合セメント(B種)の代表的な置換率として15%(FA15%)および42%(BFS42%)とした。

2.2 試験方法

2.2.1 骨材のアルカリシリカ反応性の評価と鉱物質混和材によるASR抑制効果の確認

使用骨材のアルカリシリカ反応性を調べるために、現行の化学法(JIS A1145)とモルタルバー法(JIS A1146, 湿度95%, 温度40℃の湿気槽養生, 40mm×40mm×160mm)を実施した。さらに、外部よりアルカリが常に供給される、より厳しい条件である促進モルタルバー法(ASTM C1260, 温度80℃の1N・NaOH溶液に浸漬, 25mm×25mm×285mm)を実施した。本試験方法は、14日材齢において0.1%未満(無害)、0.1~0.2%(不明確(無害と有害が存在する)), 0.2%以上(有害)と判定するものであり、RILEM AAR-2の標準試験とし世界的に普及してきている。一方、鉱物質混和材によるASR抑制効果はモルタルバー法(JIS A1146)と促進モルタルバー法(ASTM C1260)により検討した。その際に、JIS A1146での評価には、鉱物質混和材に含有されるアルカリを考慮してモルタルのアルカリ量(1.2%)を調整したのに対して、ASTM C1260ではアルカリ量の調整は実施していない。

2.2.2 モルタル薄片の偏光顕微鏡による観察

モルタルバー試験の終了後、厚さ20μmのモルタル薄片研磨試料(試験体の中央部の25mm×25mmの範囲)を作製し、偏光顕微鏡(単ニコル, クロスニコル)により骨材周辺やセメントペースト相のひび割れの発生とASRゲルの生成状況を観察した。モルタル薄片の偏光顕微鏡によるASR劣化度の判定基準を表-3⁷⁾に示す。JIS

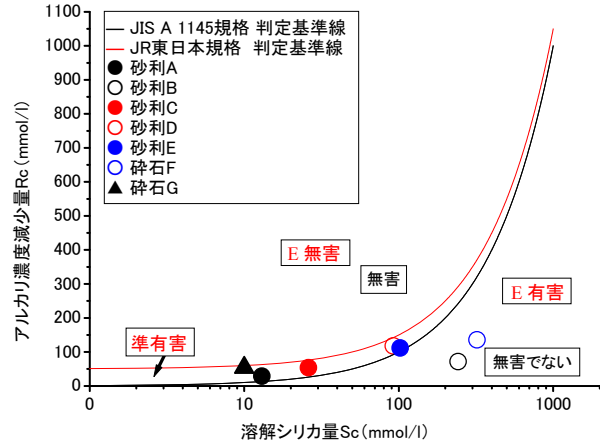


図-3 使用骨材の化学法(JIS A1145)による判定結果

表-4 JIS A1146 および ASTM C1260 によるモルタルバーの膨張率と判定結果

骨材の種類	試験体の種類	JIS A1146	ASTM C1260
		膨張率(判定*) (判定材齢6ヶ月)	膨張率(判定*) (判定材齢14日)
砂利B	OPC	0.675 (×)	0.720 (×)
	FA15%	0.011 (○)	0.058 (○)
	BFS42%	0.171 (×)	0.244 (×)
砂利E	OPC	0.068 (○)	0.425 (×)
	FA15%	-0.001 (○)	0.015 (○)
	BFS42%	0.019 (○)	0.087 (○)
砕石F	OPC	0.031 (○)	0.521 (×)
	FA15%	0.023 (○)	0.088 (○)
	BFS42%	0.047 (○)	0.230 (×)
砕石G	OPC	0.010 (○)	0.076 (○)
	FA15%	-0.006 (○)	-0.005 (○)
	BFS42%	0.009 (○)	0.023 (○)

*: ○:無害、△:不明確、×:有害または無害でない

A1146のモルタルバー法の膨張率と表-3に示すモルタルのASR劣化度のレベルとの間には良好な相関性があることが報告されている⁸⁾。

3. 実験結果および考察

3.1 骨材のアルカリシリカ反応性の評価

使用骨材の化学法(JIS A1145)による判定結果を図-3に示す。本判定にはJR東日本の判定基準⁹⁾も挿入している(Scに50を加えた値がRe未満の場合は「E無害」、ScがRe以上の場合は「E有害」とし、JIS A1145の判定線との中間範囲を「準有害」とする)。砂利Bと砕石Fは「無害でない」と判定されたが、それら以外の骨材は「無害」と判定された。また、「無害」と判定された骨材もJR東日本の判定基準によるとすべて「準有害」と判定された。現行のJIS A1145の基準では、「無害」と判定された骨材

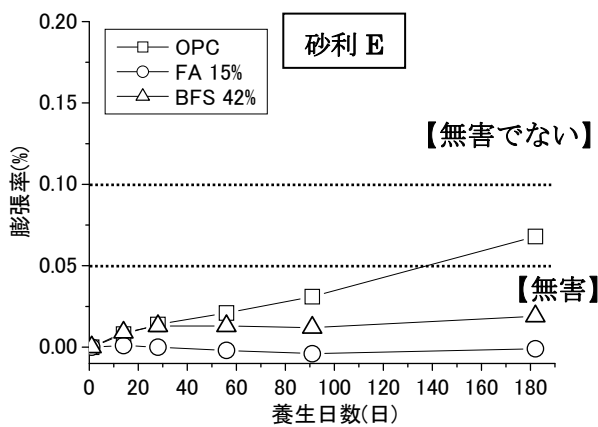
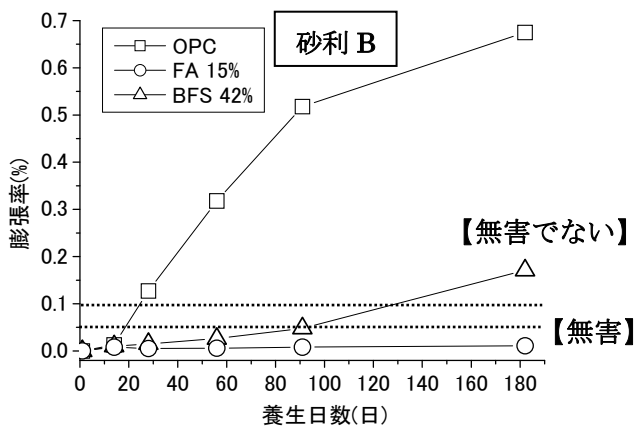


図-4 砂利 B および砂利 E のモルタルバー法 (JIS A1146) における膨張挙動

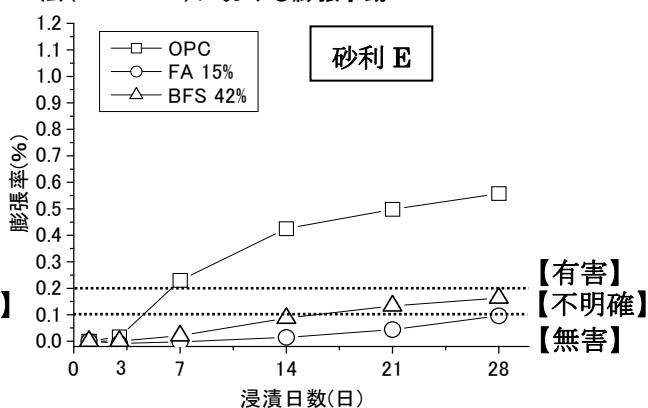
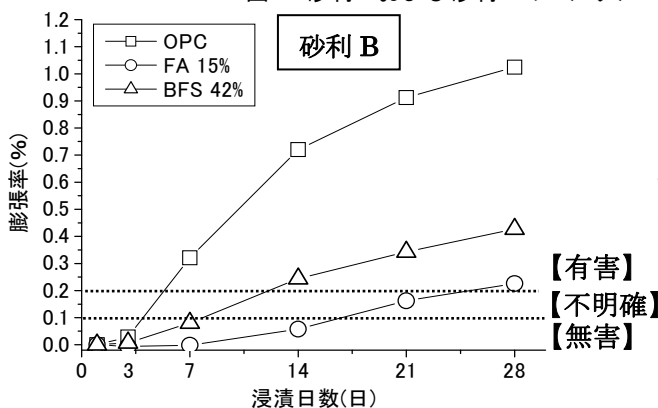


図-5 砂利 B および砂利 E の促進モルタルバー法 (ASTM C1260) における膨張挙動

はモルタルバー法 (JIS A1146) の試験は必要ないとされている。しかし、北陸地方における実構造物での ASR の発生状況を考慮すると、化学法 (JIS A1145) のみの判定では不十分であることも考えられる。

モルタルバー法 (JIS A1146) において膨張傾向が確認された砂利 B と E、および砕石 F と、更に砕石間で比較するための砕石 G、これら 4 つの骨材に対する促進モルタルバー法 (ASTM C1260) による ASR 判定の結果を表-4 に示す。構造物で実際に ASR 劣化が発生している砕石 F は、モルタルバー法 (JIS A1146) において安山岩中のモンモリロナイトがアルカリを吸着し、モルタルの膨張率がかなり小さくなり、モルタルバー法 (JIS A1146) では適切に判定できないことが知られている。砂利 B の OPC 以外の骨材は材齢 6 ヶ月の膨張率が 0.07% 以下であり、すべて「無害」と判定された。一方、促進モルタルバー法 (ASTM C1260) では、モルタルバー法 (JIS A1146) で「無害」と判定されたものの多くが「有害」と判定されており、写真-1 のように実際のコンクリート構造物での ASR の発生状況を反映した、より適切な判定結果となっている。以上より、外部からアルカリが常に供給されるような条件下では北陸地方の河川産骨材や砕石のアルカリシリカ反応性の判定には促進モルタルバー法 (ASTM C1260) が有効であることが明らかになった。

3.2 鉱物質混和材による ASR 抑制効果の比較検討

常願寺川産の砂利 B と九頭竜川産の砂利 E を対象にし

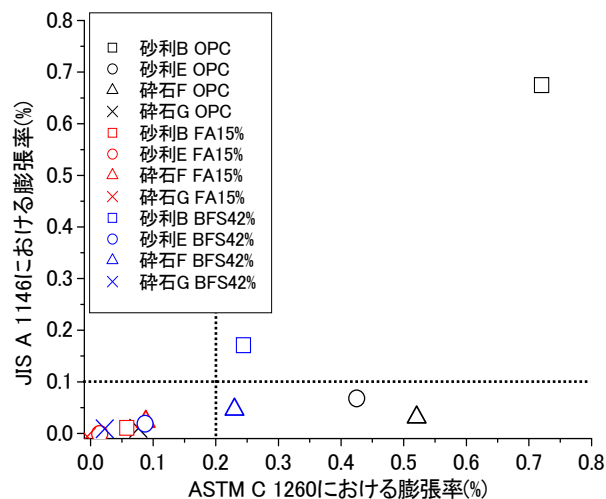


図-6 JIS A1146 の膨張率 (判定材齢 6 ヶ月) と ASTM C1260 の膨張率 (判定材齢 14 日) との比較

て、モルタルバー (JIS A1146, ASTM C1260) の膨張挙動を比較検討した。それらの結果を図-4 および図-5 に示す。両砂利の岩石学的な相違は、前者は安山岩の含有率が後者よりも大きいことと、前者には極めて反応性が高いオパールが含有されていることである。JIS A1146 と ASTM C1260 によるモルタルバーの全体的な膨張挙動はほぼ同様であり、また ASTM C1260 は早期に膨張が促進

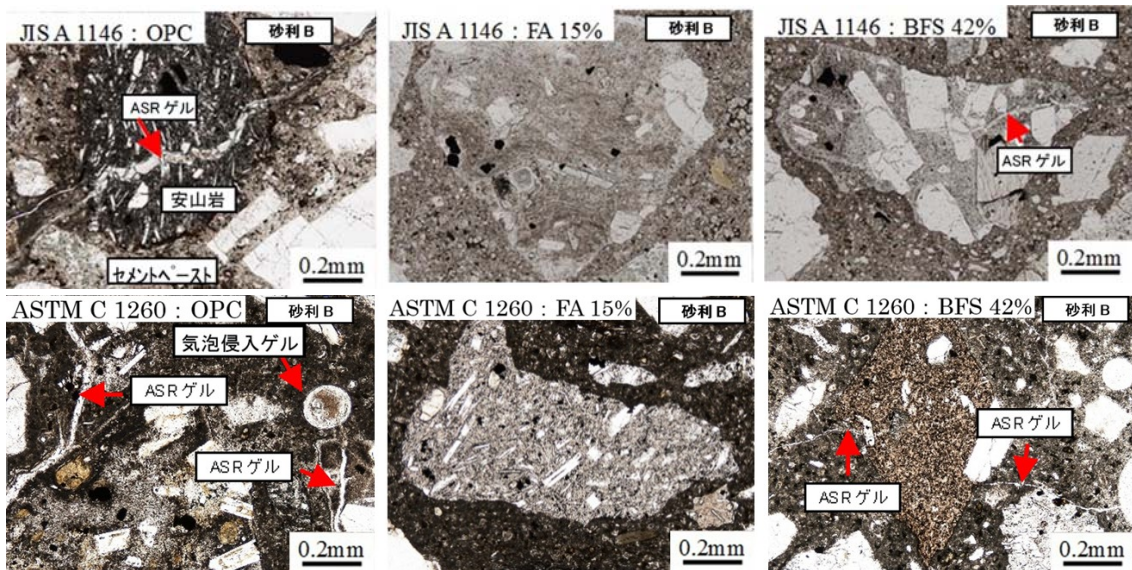


写真-2 砂利 B における JIS A1146 および ASTM C1260 終了後の偏光顕微鏡による薄片観察結果

されているので、FA15%やBFS42%による ASR 抑制効果を明確にすることができた。一方、JIS A1146 によりほとんど膨張が発生しなかった両砂利以外の骨材に対しても、ASTM C1260 では OPC と FA15%、BFS42%における膨張挙動の相違を確認できた。

JIS A1146 (材齢 6 ヶ月) と ASTM C1260 (材齢 14 日) におけるモルタルバーの膨張率の比較を図-6 に示す。前述したように、JIS A1146 により「無害」と判定された骨材でも ASTM C1260 により「有害」と判定されたものが存在した。さらに、OPC と FA15%、BFS42%との判定結果を比較すると、JIS A1146 と ASTM C1260 の両試験法により、FA15%はすべて「無害」と判定された。それに対して、BFS42%は JIS A1146 により「無害」と判定されたものでも ASTM C1260 により「有害」と判定されたものがあつた。同様に、JIS A1146 で「無害でない」と判定された砂利 B の BFS42%は ASTM C1260 でも「有害」と判定された。以上より、ASTM C1260 は JIS A1146 よりも早期に判定が可能となる利点があり、FA15%や BFS42%による ASR 抑制効果の確認にも有効であることが明らかになった。また、きわめて反応性が高く、ペシマム混合率を有する砂利 B に対しても、FA15%は BFS42%よりも ASR 抑制効果が顕著であり、完全に ASR を抑制することができた。分級フライアッシュの ASR 抑制効果の実績を踏まえて、実際に、新潟県高橋架橋事業では、新潟県阿賀野川産河川骨材(砂利 B と同様に、安山岩が主要な岩種であり、高い反応性がある)の ASR 抑制対策として、すべてのコンクリートに七尾大田産の分級フライアッシュ 20%混入する対策を決定しており、平成 23 年夏よりコンクリートの打設が始まっている。

3.3 偏光顕微鏡によるモルタル研磨薄片の ASR 劣化度の観察

表-5 偏光顕微鏡観察による ASR 劣化度の判定結果

骨材の種類	試験法	OPC	FA15%	BFS42%
砂利B	JIS A 1146	IV	I	II
	ASTM C 1260	V	I	III
砂利E	JIS A 1146	III	0	II
	ASTM C 1260	IV	I	III
碎石F	JIS A 1146	0	0	0
	ASTM C 1260	IV	I	III
碎石G	JIS A 1146	0	0	0
	ASTM C 1260	II	0	I

砂利 B を対象に実施した、JIS A1146 と ASTM C1260 の終了後の薄片試料(中央部)の偏光顕微鏡による観察結果を写真-2 に示す。JIS A1146 と ASTM C1260 の両試験法において ASR が発生しているのは安山岩粒子であり、それ以外の岩種は ASR がほとんど発生していなかった。従って、両モルタルバー試験法において ASR が発生している岩種は一致していた。また、OPC と FA15%、BFS42%の ASR による微細ひび割れの発生状況を比較すると、JIS A1146 の場合、OPC は ASR ゲルが充填された膨張ひび割れが安山岩の骨材粒子内に発生し、セメントペーストへのひび割れの進展が顕著であつた。また、BFS42%は OPC よりも ASR 発生が抑制されていたが、安山岩粒子内に ASR ゲルが充填した微細な膨張ひび割れが発生していた。それに対して、FA15%は安山岩粒子の周囲に反応環がわずかに観察されるのみであつた。一方、ASTM C1260 の場合、OPC や BFS42%では ASR によるひび割れの密度と幅が JIS A1146 の観察結果よりも大きくなつていた。しかし、FA15%は JIS A1146 と同様に ASR ゲルによる膨張ひび割れが観察されなかった。

モルタルバー試験終了後のモルタル研磨薄片の偏光顕微鏡の観察に基づく ASR 劣化度の一覧を表-5 に、その ASR 劣化度レベルの判定結果とモルタルバー (JIS A1146、ASTM C1260) の膨張率との関係を図-7 に示す。4 種類の骨材に対する ASR 劣化度レベルの判定結果は、

ASTM C1260 においてもモルタルバーの膨張率との間に明確な相関性があった。ASTM C1260 における FA15%と BFS42%では、NaOH 溶液に接する試験体の周縁部(3mm 程度)が内部と比較して、より進行した ASR 劣化度が観察された。これは、ポゾラン反応による組織緻密化により、内部へのアルカリ浸透が抑制されていることが考えられた。同様に、偏光顕微鏡によるモルタルバーの観察結果からも、OPC に対する FA15%や BFS42%の ASR 抑制効果の有効性を確認することができた。フライアッシュと高炉スラグ微粉末の ASR 抑制のメカニズムの相違について、広野、鳥居⁸⁾は、フライアッシュは粒子周縁部の反応領域に低 Ca/Si 比(0.9 程度)の C-S-H が形成され、それらがアルカリイオンを吸着することによる細孔溶液の pH 低減作用が生じるのに対して、高炉スラグ微粉末は生成する C-S-H の Ca/Si 比が OPC と同様に高いので、その置換率をより大きくしないと ASR 抑制効果が発揮できないことを指摘している。本研究の結果より、分級フライアッシュはポゾラン反応性や ASR 抑制効果が大きく改善されており、北陸地方の反応性骨材に対する地域的な ASR 対策として有効に活用できることが明らかになった。

4. 結論

北陸地方の代表的な骨材 7 種に対して、分級フライアッシュと高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果を比較検討した結果をまとめると、以下のようである。

- (1) 北陸地方における実構造物での ASR の発生状況を考慮すると、骨材の化学法(JIS A1145)のみの ASR 判定では不十分であった。
- (2) 北陸地方の河川産骨材や砕石の ASR 判定には、促進モルタルバー法(ASM C1260)が有効に活用できた。
- (3) 促進モルタルバー法(ASM C1260)はモルタルバー法(JIS A1146)よりも早期に判定が可能となる利点があり、FA15%や BFS42%による ASR 抑制効果の確認にも有効であった。
- (4) きわめて反応性が高く、ペシマム混合率を有する砂利 B に対しても、FA15%は BFS42%よりも ASR 抑制効果が大きく、完全に ASR を抑制することができた。
- (5) 分級フライアッシュはポゾラン反応性や ASR 抑制効果が大きく改善されており、北陸地方の反応性骨材に対する地域的な ASR 対策として有効に活用できた。

謝辞：本研究は、産学官連携による「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの利用促進検討委員会（委員長：金沢大学教授鳥居和之）」の作業部会での研究開発の一環として実施したものである。

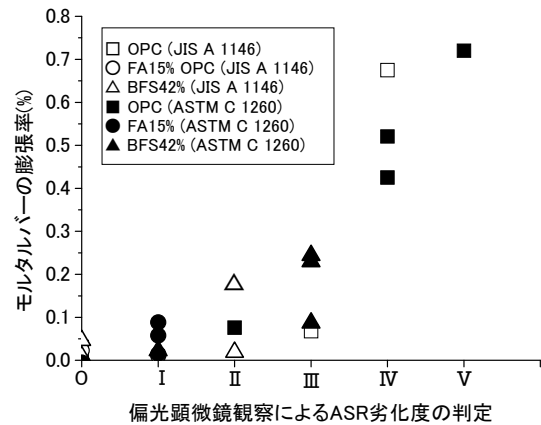


図-7 JIS A1146 および ASTM C1260 におけるモルタルバーの膨張率と偏光顕微鏡観察による ASR 劣化度の判定

参考文献

- 1) 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, No.767, pp.185-197, 2004
- 2) 佐藤良恵, 山戸博晃, 藤村友樹, 鳥居和之: 北陸地方の ASR 劣化コンクリートの岩石・鉱物学的調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1279-1284, 2009
- 3) 丑屋智志, 出口一也, 野村昌弘, 鳥居和之: 福井県の骨材のアルカリシリカ反応性と ASR 劣化橋梁に関する調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1007-1012, 2011
- 4) T. Hashimoto and K. Torii: The Development of Highly Durable Concrete Using Classified Fine Fly Ash in Hokuriku District, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.11, pp.312-321, 2013
- 5) 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 報告書-コンクリート構造物の長寿命化と環境負荷低減を目指して-富山・石川・福井版, 2013
- 6) 広野真一, 鳥居和之: 北陸地方を代表する安山岩系骨材のアルカリシリカ反応性とフライアッシュによる抑制機構, セメント・コンクリート論文集, No.66, pp.499-506, 2013
- 7) 西澤彩, 蟹谷真生, 山戸博晃, 鳥居和之: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.934-939, 2012
- 8) 広野真一, 安藤陽子, 大代武志, 鳥居和之: フライアッシュと高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果の比較, セメント・コンクリート論文集, No.67, pp.453-460, 2014
- 9) ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会 報告書, 2012