

論文 PC 桁・PCa 製品の ASR 抑制対策としての分級フライアッシュの効果

吉田 匠吾^{*1}・板坂 匠^{*2}・Irfan Prasetia^{*3}・鳥居 和之^{*4}

要旨：本研究では、PC 桁・PCa 製品の ASR 抑制対策として分級フライアッシュを用い、3 種類の促進モルタルバー法による比較試験により ASR 抑制効果を検証した。試験要因は、反応性骨材を結晶質安山岩砕砂、水セメント比を 35% および 50%、分級フライアッシュ置換率を 10% および 20% とした。また、促進モルタルバー試験終了後に、ASR ゲルやひび割れの発生状況を偏光顕微鏡観察などにより確認した。その結果、早強ポルトランドセメントを使用したモルタル（水セメント比 35%）では、分級フライアッシュを 20% 添加することにより ASR 発生を効果的に抑制できるということが明らかになった。

キーワード：ASR 抑制対策、分級フライアッシュ、PC 桁・PCa 製品、促進モルタルバー法、偏光顕微鏡観察

1. はじめに

近年、北陸地方ではアルカリシリカ反応（ASR）がプレレストコンクリート（PC）桁やプレキャスト製品（PCa）にも発生していることが確認されている¹⁾。このため、北陸地方では、国や県、市町村などで実施している「橋梁の長寿命化修繕計画の策定」において PC 橋梁の高耐久化（長寿命化）が重要な課題の 1 つになっている。

北陸地方では、能登半島全域で安山岩砕石が使用された経緯があり、能登有料道路や国道 249 号線などで鉄筋破断を伴う深刻な ASR が発生している。また、富山県の常願寺川、神通川の全域、石川県の手取川の上流域、福井県の九頭竜川の上流域からの河川産骨材に高い反応性を示す安山岩粒子が含有されていることが明らかになっている。また、北陸地方には、地場産業として PC 桁や PCa 製品の企業が多く存在する。その一方で、写真-1 および写真-2 に示すように、工場製作のコンクリート製品に ASR によるひび割れが発生するといった問題が発生している。これらの ASR 事例では、アルカリ総量規制値（3kg/m³）以下の条件でも実際に ASR によるひび割れが発生しており、混合セメントの使用による、新たな ASR 対策が必要になっている²⁾。さらに、PC 桁・PCa 製品の製造では、早強ポルトランドセメントを使用した高強度の仕様（50N/mm²クラス）となり、通常、蒸気養生やオートクレーブ養生を実施するので、レディーミクストコンクリートを対象とした ASR 対策（JIS A5308）とは別途のものが要求される。

このような背景から、今後フライアッシュのコンクリートへの有効利用を促進することが新たな課題となってい

る。フライアッシュのコンクリートへの利用拡大には「品質の安定」と「供給体制の確立」が重要になるが、従来、フライアッシュはこれらの条件が満足されておらず、コンクリート製造者からは使用が敬遠されていた経緯があった。この問題を解決するために、「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」が発足し、高品質フライアッシュの安定供給とフライアッシュコンクリートのマニュアル作製に向け活動が行われている²⁾。

本研究では、PC 桁・PCa 製品の ASR 対策として、分級フライアッシュを活用することを目的として、3 種類の促進モルタルバー法により分級フライアッシュによる ASR 抑制効果を実験的に検証した。さらに、フライアッシュおよび高炉スラグセメント B 種の汎用化を念頭にいれ、両者の比較実験も実施した^{3),4)}。

2 実験概要

2.1 使用材料および配合

本研究にて使用した早強ポルトランドセメント、分級フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の化学成分を表-1 に示す。また、安山岩砕砂の化学成分を表-2 に示す。本研究には、早強ポルトランドセメント（略号：HOPC，U 社製，密度：3.14g/cm³，ブレン粉末度：4300cm²/g，Ig.loss：0.89%），分級フライアッシュ（略号：FA，七尾大田石炭火力発電所産，JIS I 種灰相当（JIS A6201），密度：2.44g/cm³，ブレン粉末度：4780cm²/g，Ig.loss：2.0%），高炉スラグ微粉末（略号：BFS，S 社製，密度：2.91 g/cm³，ブレン粉末度：6030 cm²/g，Ig.loss：1.0%）を使用した。

近年、七尾大田石炭火力発電所では、石炭の炭種をオ

*1 金沢大学大学院 自然科学研究科博士前期課程環境デザイン学専攻（学生会員）

*2 JFE エンジニアリング（株）（正会員）

*3 金沢大学大学院 自然科学研究科博士後期課程環境科学専攻（学生会員）

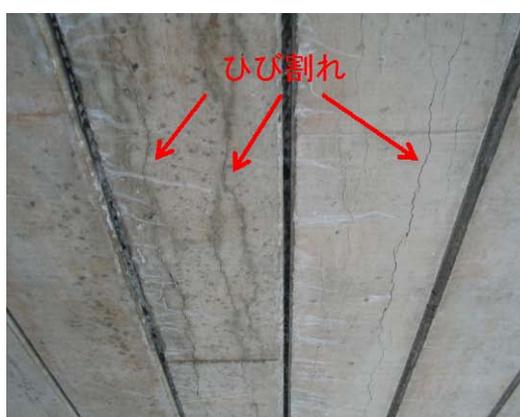
*4 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 工博 教授（正会員）

表一 早強ポルトランドセメント、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末の化学成分 (%)

	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	total
HOPC	0.9	20.5	5.3	2.5	65.9	0.8	---	---	3.1	0.2	0.3	99.6
FA	2.0	53.6	28.9	6.7	3.2	0.8	1.4	0.1	0.2	0.3	0.7	97.9
BFS	0.6	33.0	13.6	0.1	42.6	5.8	0.6	0.2	3.1	0.2	0.2	99.9

表二 安山岩砕砂の化学成分 (%)

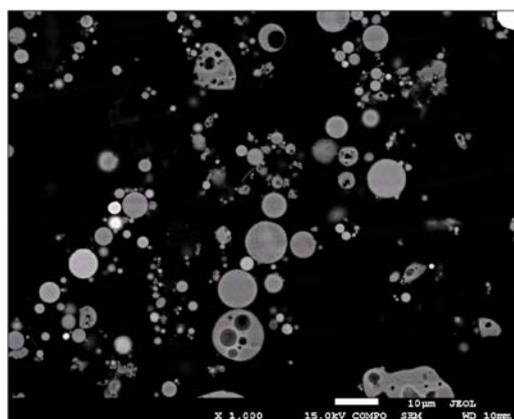
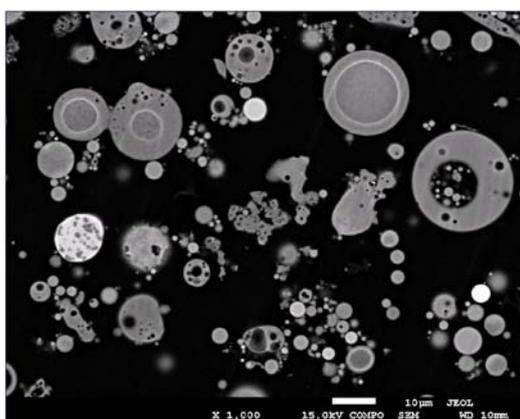
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	MnO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	total
安山岩砕砂	61.6	20.3	6.0	5.0	1.0	0.6	0.1	0.2	2.5	2.4	99.7



写真一 プレテンション式PCホロースラブ桁のASR事例(石川県、庄川産川砂利、HOPC)



写真二 電柱のASR事例(富山県、神通川産川砂、HOPC)



写真三 フライアッシュの粒子形状の比較(左:原粉, 右:分級灰)(倍率:1000倍)

オーストラリアからの瀝青炭のみに限定するとともに、ボイラーの燃焼負荷を考慮しながら採取した JIS II 種灰品をさらにサイクロンにより分級している。この結果、写真三に示すように、最大粒径が 10 μ m 以下で、かつ球形の均一な粒子(平均粒径: 7.6 μ m)である高品質フライアッシュが年 3 万トン製造されている。フライアッシュ原粉を分級することにより、フライアッシュの構成

物である結晶質の石英(含有率 5.4%→5.0%)やムライト(含有率 26.7%→20.6%)が減少し、シリカ質のガラス(含有率 65.1%→73.2%)が増大するので、ポゾラン活性に富んだもの(JIS A6201, 活性度指数(28日材齢): 89%, 活性度指数(91日材齢): 103%)になることが明らかになっている⁵⁾。

使用骨材は、北海道札幌近郊産の安山岩砕砂(化学法

(JIS A1145) の結果 $Sc=688\text{mmol/l}$, $Rc=78\text{mmol/l}$, $Sc/Rc=8.8$) を使用した。骨材の粉末 X 線回折分析結果を 図-1 に示す。安山岩砕砂の主要な反応性鉱物はクリストバライト (またはトリディマイト) であり、火山ガラスがほとんど含まれていないことが岩石学的特徴である。このことから、本砕砂はペシマム現象が顕著に現れる反応性骨材であると言える。

本研究では、PC 桁・PCa 製品の ASR 対策の提案を目的としており、早強ポルトランドセメントを使用したモルタルの水セメント比を 35% および 50%、分級フライアッシュの置換率を 10% および 20%、高炉スラグ微粉末の置換率を 50% とした。なお、図中では早強ポルトランドセメントのみのモルタルを HOPC、フライアッシュ 10% 置換のものを FA10%、フライアッシュ 20% 置換のものを FA20% と表記した。

2.2 促進モルタルバー法による膨張量測定

(1) JIS A1146 による評価

セメント、フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末では、それぞれ含有するアルカリの形態が異なり、ASR に及ぼす影響も相違することが指摘されている⁶⁾。本試験ではフライアッシュや高炉スラグ微粉末のアルカリ量を考慮し、セメントの等価 Na_2O 量が 1.2% になるように 1N の水酸化ナトリウム溶液の添加により調整した。この際、フライアッシュと高炉スラグ微粉末のアルカリ量は化学成分分析によって得られた結果を考慮している。また、モルタルバー (40×40×160mm) は温度 40°C、相対湿度 95% 以上で養生をし、長さ変化を測定した。JIS A1146 では、0.05% 以上 (3 ヶ月材齢) または 0.1% 以上 (6 ヶ月材齢) の膨張量を「無害でない」と判定する。

(2) デンマーク法による評価

セメントのアルカリ量を調整せず、モルタルバー (40×40×160mm) を温度 50°C の飽和 NaCl 溶液に浸漬し、長さ変化を測定した。デンマーク法では、3 ヶ月材齢にて 0.1% 以上 (無害)、0.1%~0.4% (無害と有害の両者が存在)、0.4% 以上 (有害) と判定する。なお、試験終了後、0.1N の硝酸銀溶液をモルタルの破断面に噴霧し、塩分の浸透深さを調べるとともに、酢酸ウラニル蛍光法により ASR ゲル発生状況を観察した。

(3) ASTM C1260 による評価

セメントのアルカリ量は調整せず、モルタルバー (25×25×285mm) を温度 80°C の 1N の NaOH 溶液に浸漬し、長さ変化を測定した。ASTM C1260 では、14 日材齢にて、0.1% 以下 (無害)、0.1%~0.2% (無害と有害の両者が存在)、0.2% 以上 (有害) と判定する。

2.3 偏光顕微鏡による薄片研磨試料観察

表-3 偏光顕微鏡観察による ASR 劣化度の判定⁸⁾

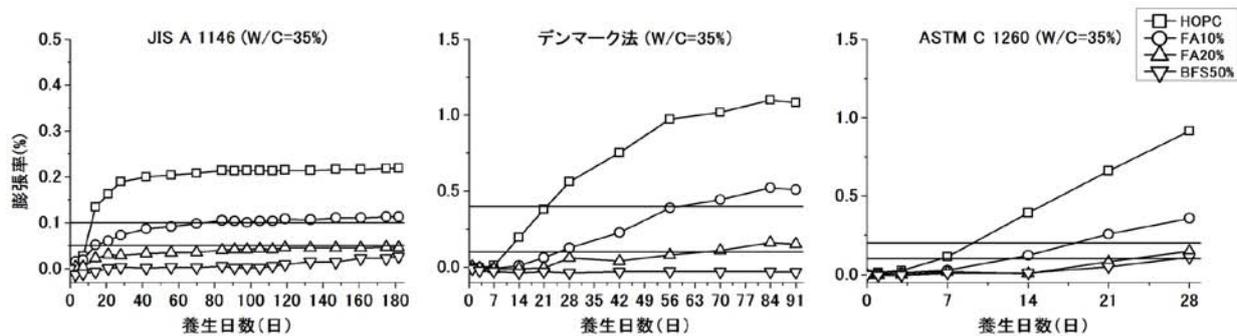
レベル	ひび割れの発生及び反応状況
I	反応環の形成と反応性骨材粒子からの ASR ゲルの析出
II	反応性骨材粒子からのひび割れの発達
III	反応性骨材粒子からセメントペーストへひび割れの進展 (最大ひび割れ幅 25 μm 以下)
IV	連続的なひび割れ網の形成と ASR ゲルの気泡への侵入 (最大ひび割れ幅 25-50 μm)
V	連続的なひび割れ網の形成と ASR ゲルの気泡への侵入 (最大ひび割れ幅 50 μm 以上)

膨張試験の終了後に、モルタルバーより薄片研磨試料 (厚さ: 20 μm) を作製し、偏光顕微鏡により ASR ゲルやひび割れの発生状況を観察した。薄片試料のサイズは 25×30mm であるため、ASTM C 1260 においては 25×25mm の試料を作製し、JIS A 1146 およびデンマーク法においては 40×40mm の断面の中央部から 25×30mm の試料を作製した。偏光顕微鏡による観察箇所は薄片試料中央部とした。薄片の ASR 劣化状況の分類を表-3 に示す^{7,8)}。

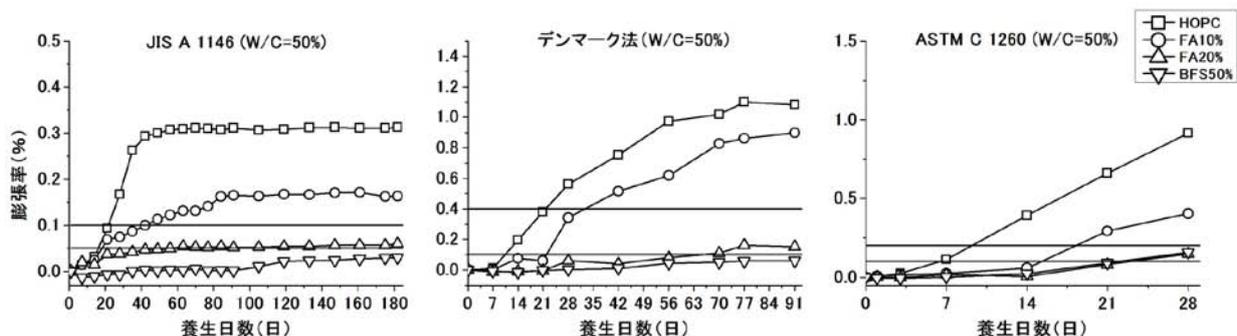
3. 実験結果および考察

3.1 モルタルバー法による評価

各種モルタルバー法 (JIS A 1146, デンマーク法, ASTM C 1260) におけるモルタル (W/C=35% および 50%) の膨張挙動を 図-2 および 図-3 に示す。PC 桁・PCa 製品に使用する低水セメント比の配合では、内部組織が緻密であるため、内部での水分やアルカリの移動と外部からのアルカリの浸透が低減されることによる ASR 抑制効果が期待できる。その一方で、セメント量 (アルカリ量) が増大することによる ASR 促進効果が存在する。JIS A 1146 では、HOPC モルタル (W/C=35%) のものは HOPC モルタル (W/C=50%) のものと比べて最終膨張量が 1/2 程度となり、低水セメント比による膨張量の低減効果が認められる。また、本研究では、高い反応性を有する安山岩砕砂を使用しているために、JIS A 1146 でも初期から膨張が発生しているのが特徴である。しかし、添加アルカリ量が限られているので、1 ヶ月以後の膨張が水セメント比に関係なくほぼ停止している。これはペシマム混合率の顕著な骨材に特有な現象であると言える。フライアッシュ添加したものについては、JIS A 1146 において、FA モルタル (W/C=35% および 50%) の 6 ヶ月材齢での膨張量は FA20% で 0.05% 程度となり、反応性が高い安山岩砕砂に対しても FA20% 添加による ASR 抑制効果が示された。一方、デンマーク法では、外部からの塩分の浸透とともに膨張が発生するので、膨張の開始時期が

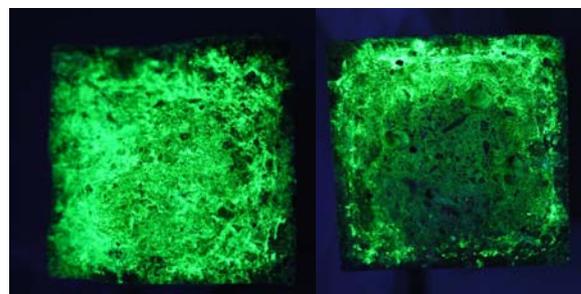


図一 安山岩砕砂を用いたモルタル (W/C=35%) の膨張挙動



図一 安山岩砕砂を用いたモルタル (W/C=50%) の膨張挙動

JIS A 1146 よりも若干遅れるが、膨張が一旦開始すると、その後は継続的な膨張が発生し、HOPC モルタル (W/C=35%および 50%) では膨張量が 1% を超えるものになった。また、ASTM C 1260 では、断面 (25×25 mm) が小さいこともあり、直ちに NaOH 溶液が全断面に浸透することにより、大きな膨張が初期から発生し、材齢 28 日まではほぼ直線的に膨張量が増大した。デンマーク法や ASTM C 1260 ではモルタルの表面にひび割れが発生すると、表面のひび割れを通してアルカリ溶液が内部に浸透するために、溶液の浸透とともにモルタル中の反応領域が拡大し、低水セメント比による膨張量の低減効果が消失するようである。その一方で、ASTM C 1260 でも、材齢 14 日での FA モルタルの膨張量が FA10% で 0.15% 程度 (無害と有害の両者が存在)、FA20% で 0.08% 程度 (無害) となり、FA20% 添加によるモルタルの膨張量の低減効果が明確に認められた。デンマーク法試験終了後の塩分浸透深さと酢酸ウラニル蛍光法による発色の領域 (ASR ゲルは緑黄色に発色する) の測定を行ったところ、FA モルタルでは、低水セメント比のものほど、また FA 置換率の大きなものほど、長期間にわたり ASR が効果的に抑制されているのが確認できた。FA 添加により塩分浸透が低減され、写真—4 に示すとおり、ASR の発生が試験体の表面部に限定されたことによる効果が確認できた。塩分浸透深さに関しては、W/C=50% の試験体においては

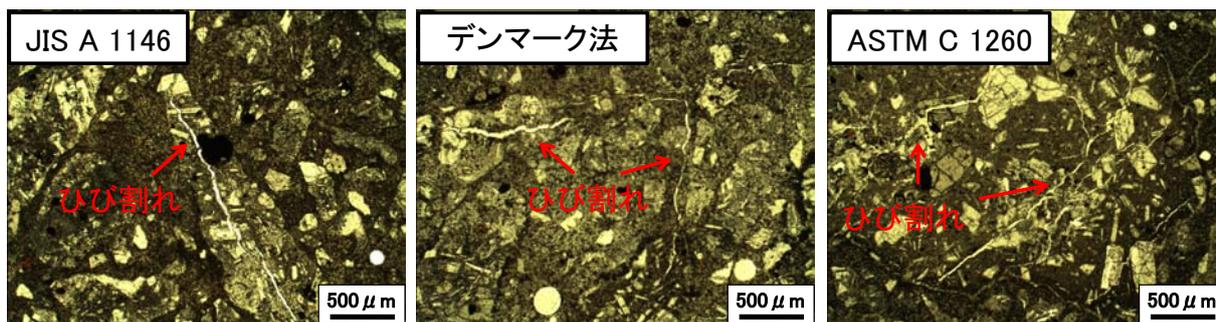


写真—4 酢酸ウラニル蛍光法観察結果

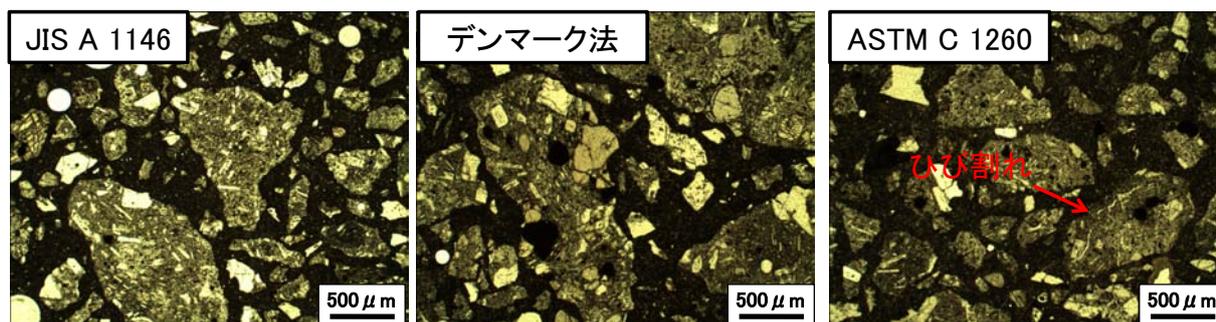
(左 : W/C=35% HOPC, 右 : W/C=35% FA20%, 40×40mm)

HOPC が全域に浸透、FA10% も全域に浸透、FA20% が 9.0mm の浸透、W/C=35% の試験体においては HOPC が全域に浸透、FA10% が 10.5mm の浸透、FA20% が 4.9mm の浸透となった。このことから、凍結防止剤に対するフライアッシュの有用性が示されたと考えられる。北陸地方などの寒冷地では、凍結防止剤による高濃度の NaCl 溶液に曝される機会が増えている。このような使用・環境下では、PC 桁・PCa 製品における FA 添加の効果がより発揮されるものと期待される。

分級フライアッシュと高粉末度の高炉スラグ微粉末との比較に関して、3 種類の促進モルタルバー法の結果より、FA20% と BFS50% の ASR 抑制効果はほぼ同程度であり、フライアッシュセメントおよび高炉スラグセメントのそれぞれ B 種に相当する置換率により ASR を効果的に



写真一五 各種試験終了後のモルタル (W/C=35%, HOPC) の薄片観察結果



写真一六 各種試験終了後のモルタル (W/C=35%, FA20%) の薄片観察結果

表一四 各種モルタルバーの判定結果

	W/C=35%			W/C=50%		
	HOPC	FA10%	FA20%	HOPC	FA10%	FA20%
JIS A 1146	無害でない	無害でない	無害	無害でない	無害でない	無害
デンマーク法	有害	有害	不明確	有害	有害	不明確
ASTM C 1260	有害	不明確	不明確	有害	有害	不明確

表一五 偏光顕微鏡観察による ASR 劣化度の判定結果

	W/C=35%			W/C=50%		
	HOPC	FA10%	FA20%	HOPC	FA10%	FA20%
JIS A 1146	III	II	I	III	II	I
デンマーク法	IV	III	II	IV	III	II
ASTM C 1260	V	IV	II	V	IV	III

に抑制できることが示唆されている。しかし、両者間では ASR 抑制のメカニズムが相違するようである。JIS A 1146 のようなアルカリ内在型の試験では、フライアッシュはポズラン反応の過程で生成する、低 C/S 比の C-S-H によるアルカリ吸着作用の効果（細孔溶液の OH⁻ 濃度の低下）が大きく貢献するのに対して、高炉スラグ微粉末の置換率 50% はフライアッシュの置換率 20% に比べてかなり大きいことから判断すると、セメントのアルカリ希釈作用による効果が大きいと考えられる⁹⁾。一方、デンマーク法や ASTM C 1260 のようなアルカリ外来型の試験では、ポズラン反応による内部組織の緻密化により、反応が試験体表面に限定されていた。これは混和材によるさがあまり見られなかった。

JIS A1146, デンマーク法および ASTM C1260 では、ASR 試験でのアルカリの種類とその供給状態が異なり、この順番でより過酷な環境条件での ASR 試験となる。こ

のため、JIS A1146, デンマーク法および ASTM C1260 では、同様にこの順番で最終的な膨張量が大きくなり、早期での評価が可能となる。この際に、骨材の ASR 試験法の適合性に関連して、反応性骨材の岩種や反応性鉱物の種類に注意して判定することが必要である¹⁰⁾。

本研究に使用した砕砂に関しては、表一四 に示すように、JIS A 1146 (182 日材齢) とデンマーク法 (91 日材齢)、ASTM C 1260 (14 日材齢) の間には良好な相関性が確認できるとともに、フライアッシュや高炉スラグ微粉末の ASR 抑制効果の早期判定にデンマーク法や ASTM C 1260 の適用が可能であることが判明した。

3.2 偏光顕微鏡による薄片試料観察

各種モルタルバー試験終了後に作製した薄片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一五、写真一六および表一五に示す。各種モルタルバ

一試験結果(表一4)と偏光顕微鏡観察による ASR 劣化度の判定結果においてはよく一致していた。すなわち、JIS A 1146 においては、HOPC (W/C=50%, ASR レベル: III) ではひび割れ(幅 25 μ m 以下)が骨材からセメントペーストへ進展していた。それに対して、FA20% (W/C=50%, ASR レベル: I) ではひび割れの発生は観察されなかった。ASTM C 1260 においては、HOPC (W/C=35%, ASR レベル: V) では骨材内に大きなひび割れ(幅 100 μ m)が多数観察され、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、FA20% (W/C=35%, ASR レベル: II) では、ひび割れの幅、密度がともに減少していた。さらに、FA 粒子の一部は NaOH 溶液との反応により溶解しており、FA 粒子が先行的に NaOH 溶液と反応することにより安山岩粒子の反応を抑制する保護機能が発揮されていた。

一方、デンマーク法においては、水セメント比による ASR 劣化度の相違は明確に確認できなかった。ASTM C 1260 と同様に、HOPC (W/C=50%, ASR レベル: IV) では、骨材よりセメントペーストへひび割れ(25 μ m 以下)が進展していた。それに対して、FA20% (W/C=50%, ASR レベル: II) では骨材内に生じた軽微なひび割れはセメントペーストまで進展していなかった。

4. まとめ

PC 桁・PCa 製品の ASR 抑制対策としての分級フライアッシュの効果を評価するために実施した、今回の一連の試験により得られた結果をまとめると以下のようである。

- (1) 分級フライアッシュは細かい粒径で、かつガラス相に富んだ鉱物組成であるので、フライアッシュのポゾラン活性度が増大した。
- (2) 過酷なアルカリ条件下における促進モルタルバー法の結果より、FA20%モルタルは HOPC モルタルと比較して長期にわたり ASR 膨張を効果的に低減できた。
- (3) 分級フライアッシュ(ブレン粉末度: 5000)と高粉末度の高炉スラグ微粉末(ブレン粉末度: 6000)は、FA20%と BFS50%(セメント B 種相当)にてほぼ同等の ASR 膨張の低減効果を示した。
- (4) JIS A1146 とデンマーク法、ASTM C 1260 の試験結果には相関性があり、促進モルタルバー法はフライアッシュや高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果の早期判定に活用できた。
- (5) 各種モルタルバー試験終了後に偏光顕微鏡による薄片観察を実施することによりフライアッシュの ASR 抑制効果とそのメカニズムを検証することができた。

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有効利用促進検討委員会(委員長: 鳥居和之)」の共通試験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。

参考文献

- 1) 尾花祥隆, 鳥居和之: プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化事例の検証, コンクリート工学年次論文集, Vol. 30, No.1, pp. 1065-1070, 2008
- 2) 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-北陸地方の ASR 問題への取り組みと情報発信-, 電力土木, No.357, pp.11-15, 2012
- 3) 蔡云峰, 鳥居和之, 横山博司, 古川柳太郎: 促進養生法による高炉スラグ微粉末の ASR 抑制効果の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.763-768, 2005
- 4) 松村将充, 蓑田理希, 蔡云峰, 鳥居和之: 高炉スラグ微粉末を含有したプレストレストコンクリートのアルカリシリカ反応性の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp. 803-808, 2006
- 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: 「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(富山・石川版), pp.2-14, 2012
- 6) 日本コンクリート工学協会: 作用機構を考慮したアルカリ骨材反応の抑制対策と診断研究委員会報告書, pp.68-81, 2008
- 7) 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
- 8) 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剤による 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
- 9) 川村満紀, 竹本邦夫: 混和剤によるアルカリ量の低減とアルカリ・シリカ膨張の抑制, セメント技術年報, No.40, pp.328-331, 1986
- 10) 鳥居和之, 山戸博晃: 北陸地方における骨材の岩石・鉱物学的特徴と ASR 試験の適合性, セメント・コンクリート, pp.53-56, No.738, 2008