

# 論文 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

菊地 弘紀\*1・山戸 博晃\*2・広野 真一\*3・鳥居 和之\*4

**要旨:** ASR 抑制対策以後, ASR の発生は確実に減少している。その一方で, 近年, プレストレストコンクリート橋梁 (PC) やプレキャストコンクリート部材 (PCa) の一部にてアルカリシリカ反応 (ASR) による深刻な劣化事例が確認されている。それらに使用した骨材は, 化学法にて「無害」と判定された川砂や陸砂によるものであり, さらにアルカリ総量が  $3\text{kg/m}^3$  以下の条件で ASR が発生しているのが特徴である。そこで本研究では, PC 橋梁や PCa 部材にて発生した ASR 劣化の特徴を偏光顕微鏡観察により検証するとともに, コンクリートの細・粗骨材の組み合わせによる組成ペシマム現象を実験的に確認したものである。

**キーワード:** ASR, PC 橋梁, PCa 部材, 偏光顕微鏡観察, 組成ペシマム現象

## 1. はじめに

ASR 抑制対策 (昭和 61 年) 以後, わが国では ASR の発生が減少してきたのは事実である。これにはセメントの原料が粘土から石炭灰に代わり, セメントのアルカリ量自身が 0.5% まで減少してきたことが大きく寄与している。一方, 石川県能登産の安山岩砕石や富山県産の河川骨材を使用した構造物では, 現在でも ASR が発生している。これらの構造物の調査では, アルカリ総量が  $2.2 \sim 2.4 \text{ kg/m}^3$  であり, アルカリ総量規制値 (JIS A 5308) が遵守されていたことが報告されている<sup>1)2)</sup>。近年, PC 橋梁・PCa 部材の一部で深刻かつ早期での ASR の発生が確認されている<sup>3)</sup>。PC 橋梁・PCa 部材は, 内部拘束鉄筋量が少ないことから, PC 鋼材や部材方向に沿った, 卓越したひび割れが発生するのが特徴でもある。また, それらの PC 橋梁・PCa 部材の机上調査にて, 石灰石砕石と川砂, 陸砂との組み合わせによる ASR の発生があり, その際に  $2 \text{ kg/m}^3$  程度の少ないアルカリ量で ASR が実際に発生した事実があった。このように, コンクリートの細・粗骨材の組み合わせや, それに加えて骨材自身からのアルカリ溶出の影響を考慮すると, 現行の ASR 抑制対策

(JIS A 5308) は完全であるとは言えず, さらに従来, あまり注意が払われていなかった川砂や陸砂による ASR の発生に対しても今後は十分に注意を払うことが必要であると考えている<sup>4)</sup>。

そこで本研究は, PC 橋梁や PCa 部材にて発生した ASR の特徴を偏光顕微鏡観察などにより調べるとともに, コンクリートでの細・粗骨材の組み合わせによる組成ペシマム現象を実験的に確認したものである。

## 2. 調査概要

### 2.1 PC 橋梁・PCa 部材の ASR 調査の概要

ASR 劣化が発生した PC 橋梁・PCa 部材の概要を表 1 に示す。事例 I (工場製作 PC 桁) は建設後 30 数年が経過しているが, PC 桁の多くは 10 年程度で桁の下フランジにひび割れが観察されている。一方, 事例 III (現場打ち PC 舗装および PC 桁) および事例 IV (工場製作 PC ボール) は ASR 抑制対策以後 (昭和 61 年) に製造または打設のものである。PC 橋梁・PCa 部材の現地調査では, ひび割れの幅と形態, 変色, ASR ゲルの滲出, 部材の変形, 鉄筋の腐食などに着目した。また, 設計図書より,

表 1 調査対象となった PC・PCa 部材の概要

	部材の種類	建設年次 (年)	設置場所	コンクリートの種類			設計基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )
				セメントの種類	骨材の種類		
					細骨材	粗骨材	
事例 I	PC I (石川県・橋梁)	1971	平野部	HPC	陸砂	陸砂利	50
事例 II	PC II (東北地方)	1986	山間部	HPC	陸砂	石灰石砕石	35
							RC 床版
事例 III	PC III (東京都・舗装)	1998	沿岸部	HPC	山砂と陸砂	石灰石砕石	40
事例 IV	PCa I (石川県・電柱)	1999	市街地	HPC	川砂	川砂利	75

HPC: 早強ポルトランドセメント

\*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 金沢大学 理工研究域環境デザイン学系 技術専門職員 (正会員)

\*3 (株)太平洋コンサルタント 解析技術部 (正会員)

\*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-2 コンクリートプリズムの配合

試験体名	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
			W	C	FA	S	G
川砂・川砂利 OPC	50	45	160	320	—	827	1011
川砂・石灰石砕石 OPC	50	45	160	320	—	827	1030
石灰石砕砂・川砂利 OPC	50	45	160	320	—	840	1011
川砂・川砂利 FA15%	50	45	160	272	48	821	1004
川砂・石灰石砕石 FA15%	50	45	160	272	48	821	1023
石灰石砕砂・川砂利 FA15%	50	45	160	272	48	837	1004



写真-1 プレテンション式PCホロー桁（事例I）の劣化状況

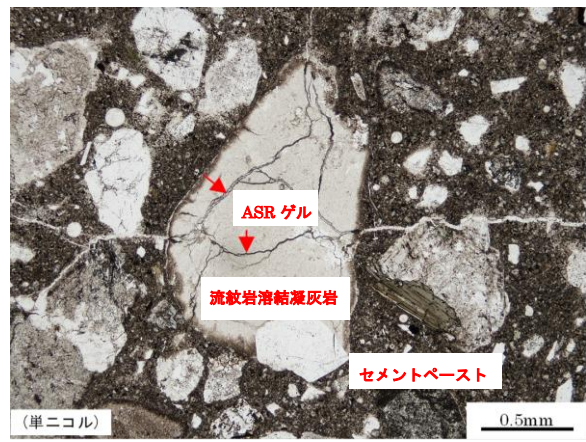


写真-2 事例Iの偏光顕微鏡による薄片観察結果（凝灰岩）

骨材の種類、コンクリートの配合（単位セメント量と水セメント比）を調査した。また、コアを採取し、コンクリートの力学的性質を調べるとともに、薄片研磨試料（厚さ：20μm）を作製し、偏光顕微鏡により骨材の岩石と反応性鉱物の種類を調べた。

## 2.2 コンクリートプリズム試験（CPT）によるASR膨張の検証

本研究では、細・粗骨材の組み合わせによるコンクリートの組成ペシマムの影響を調べることを目的として、常願寺川産骨材を使用したCPTを実施した。CPTの試験体（75mm×75mm×250mm）は、アルカリ総量をNaOH溶液により5.5kg/m<sup>3</sup>に調整した後に、試験体をステンレス製の格納容器に入れ、湿度95%以上、温度60℃の条件で促進養生した<sup>5)</sup>。JCI委員会の報告<sup>6)</sup>を参考にして、アルカリ溶脱を防ぐために、1.5 mol/lのNaOH水溶液を含ませた不織布で試験体全体を覆った。

コンクリートの配合は、表-2に示すように単位セメント量を320kg/m<sup>3</sup>、水結合材比を50%、細骨材率を45%とし、フライアッシュコンクリートはセメントの15%を内割り置換した。なお、本試験に使用した骨材は、反応性骨材として常願寺川産の川砂（密度：2.65g/cm<sup>3</sup>、吸水率：1.85%）と川砂利（密度：2.65g/cm<sup>3</sup>、吸水率：1.45%）

を、非反応性骨材として石灰石砕石（密度：2.70g/cm<sup>3</sup>、吸水率：0.55%）と石灰石砕砂（密度：2.70g/cm<sup>3</sup>、吸水率：0.61%）を用いた。常願寺川産骨材は化学法（JIS A 1145）で「無害でない」と判定され、促進モルタルバー法（ASTM C 1260）で「有害」と判定された。常願寺川産の川砂や川砂利中の安山岩粒子は、クリストバライトやトリディマイト、オパールなどの反応性鉱物を含有しており、安山岩の構成割合はペシマム含有率（30%）に一致し、このため深刻なASR劣化が報告されている<sup>1)</sup>。また、セメントは普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm<sup>3</sup>、アルカリ量：0.52%）を使用し、フライアッシュコンクリートは分級フライアッシュ（密度：2.44g/cm<sup>3</sup>、ブレン値：4870cm<sup>2</sup>/g、JIS A 6201規格のII種灰）を使用した。一方、CPT終了後にコンクリート片から薄片研磨試料（厚さ：20μm）を作製し、偏光顕微鏡により骨材のASR発生と膨張ひび割れの進展状況を観察した。なお、偏光顕微鏡によるコンクリートのASR劣化度を片山らの評価基準に従って判定した<sup>7)</sup>。

## 3. PC橋梁・PCa部材のASR劣化事例の検証

### 3.1 プレテンション式PC橋梁のASR事例（I）

プレテンションPCホロー桁のASRによる劣化状況を



写真-3 PC 橋梁・PC 床版（事例Ⅱ）の劣化状況

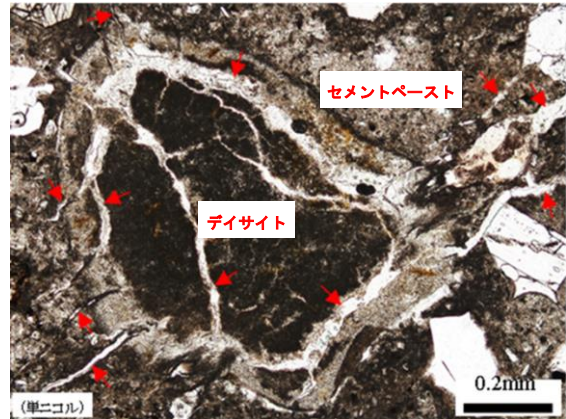


写真-4 事例Ⅱの偏光顕微鏡による薄片観察結果（石英安山岩）



写真-5 PC 舗装(事例Ⅲ)の劣化状況

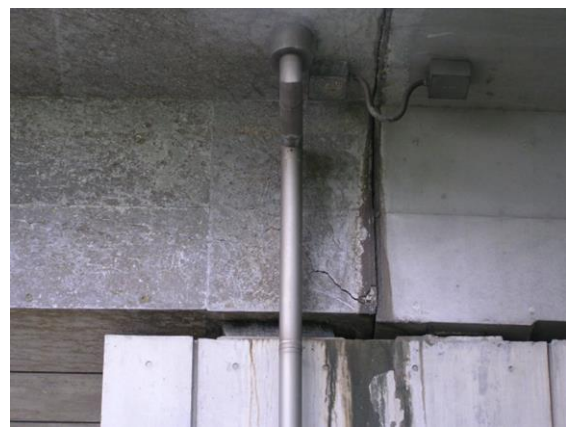


写真-6 ポストテンション式 PC 桁(事例Ⅲ)の劣化状況

写真-1 に示す。この PC 桁は石川県内の工場製作であるが、骨材には庄川産の河川骨材（一部、黒部川産の骨材）が使用されていた。石川県および富山県の市町村道に使用されており、昭和 50 年代に架設されたものに ASR が発生している。プレテンション式 PC 桁では、下フランジの側面および下面に橋軸方向のひび割れが発生しているのが特徴である。これまでの調査により、I 桁や T 桁のものはひび割れが表面に留まっており、耐荷力や使用性が低下していないが、この事例のようなホロー桁は中空部に水が滞留することにより ASR が促進され、架け替えに至ったものもある<sup>8)</sup>。コンクリート片（事例 I）の偏光顕微鏡による観察結果を写真-2 に示す。庄川産の陸砂に含有されている流紋岩質溶結凝灰岩に顕著な ASR の反応痕跡と膨張ひび割れが観察された。

### 3.2 PC 橋梁・PC 床版の ASR 事例（Ⅱ）

PC 橋梁・PC 床版の ASR による劣化状況を写真-3 に示す。この PC 床版は、東北地方の 3 径間連続ポストテンション式 PC 橋梁の柱頭部に打設されており、冬期に凍結防止剤（NaCl）が多量に散布される、厳しい使用・環境条件下にあった。PC 橋梁の RC 床版および PC 床版に用いられたコンクリートの配合上のアルカリ総量はそ

れぞれ  $2.4 \text{ kg/m}^3$  および  $2.8 \text{ kg/m}^3$  程度であり、アルカリ量の相違により PC 床版により深刻な ASR 劣化が発生したものと推測された。同様に、ポストテンション式 PC・T 桁にも ASR によるひび割れの発生が観察されたが、ASR 劣化は全体的に軽微であった。コンクリート片（事例 II）の偏光顕微鏡による観察結果を写真-4 に示す。骨材には、石灰石砕石（結晶性）と火山岩性の陸砂が使用されていた。この陸砂は安山岩や流紋岩質溶結凝灰岩、石英安山岩（デイサイト）を含有しており、安山岩粒子には組成ペシマムをもつクリストバライトやトリディマイト、オパールなどの反応性鉱物が含まれていた。その結果、PC 床版のコア片では、石英安山岩（1～2 mm）が良く反応しており、骨材粒子内のひび割れはセメントペーストに進展していた。これは石灰石砕石と火山岩性の陸砂の組み合わせの組成ペシマムによる ASR の発生事例であった。

### 3.3 PC 舗装および PC 橋梁の ASR 事例（Ⅲ）

PC 舗装の ASR による劣化状況を写真-5 および写真-6 に示す。この PC 舗装は東京都の臨海部にあり、建設後約 1 年で PC 鋼材に沿った舗装表面に幅 1 mm のひび割れが多数発生し、二夏が経過した時点で取り替えら

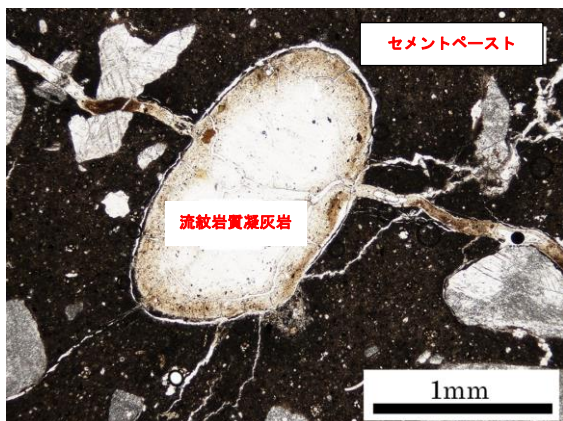


写真-7 事例Ⅲの偏光顕微鏡による観察結果 (流紋岩質凝灰岩)

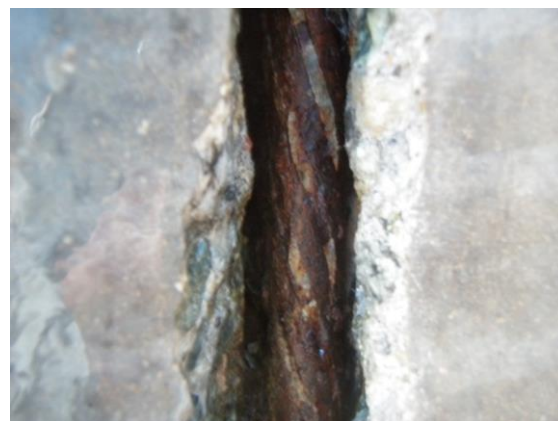


写真-8 電柱(事例Ⅳ)の劣化状況 (PC鋼線の腐食)

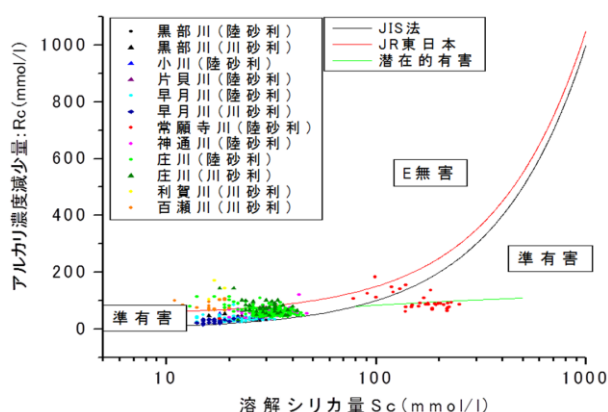


図-1 富山県産細骨材の化学法による判定結果



写真-9 事例Ⅳの偏光顕微鏡による観察結果

れた。このPC舗装は、コンクリートのアルカリ量が $2.2 \text{ kg/m}^3$ 程度であり、規制値の $3.0 \text{ kg/m}^3$ 以下であった。コンクリートには石灰石砕石と、千葉県産の山砂と北海道産の陸砂の混合物が使用されていた。山砂と陸砂は化学法(JIS A 1145)で「無害でない」と判定されたが、モルタルバー法(JIS A 1146)で「無害」と判定されていた。しかし、モルタルバー法にて0.08%の膨張率(6ヵ月の判定基準値0.1%以下)があった。コアの破断面の観察より、石灰石砕石に反応がなく、2mm程度の黒色及び褐色の粒子に反応環(リム)とASRゲルが確認された。コンクリート片(事例Ⅲ)の偏光顕微鏡による観察結果を写真-7に示す。黒色および褐色の粒子はそれぞれ安山岩と溶結凝灰岩であり、反応性鉱物(オパール)を含有する溶結凝灰岩粒子から膨張ひび割れが進展していた。本ASR事例の周辺では、写真-6に示すように、その後もPC橋梁や建造物などでASRによる劣化事例が相次いで発見されている。この事例も事例Ⅱと同様であり、石灰石砕石はアルカリを消費しないために、細骨材のごく限られた粒子のみが顕著に反応していることに注目する必要があった。このことは、骨材のASR試験法(化学法、モルタルバー法)によるスクリーニングの際に盲点にな

っており、新たな警鐘が鳴らされていると考えられた。

### 3.4 PCa・PCポールのASR事例(Ⅳ)

PCa・PCポールのASRによる劣化状況を写真-8に示す。このポール(電柱)は、富山県内の工場で製造されたものであり、建設後数年で、地際部にPC鋼線に沿った数mmの縦方向のひび割れが発生しているのが特徴であった。設計基準強度が $75 \text{ N/mm}^2$ で、水セメント比が31%で、蒸気養生とオートクレーブ養生が施されていた。また、単位セメント量が $520 \text{ kg/m}^3$ であるので、そのアルカリ量は $3.6 \text{ kg/m}^3$ となった。化学法(JIS A 1145)の結果より、使用した富山県産の川砂および川砂利はScおよびRcの値がともに $50 \text{ mmol/l}$ 以下であり、いずれも「無害」と判定されていた。しかし、コンクリートのASRの反応痕跡を観察すると、川砂には安山岩粒子(黒灰色)が含まれており、常願寺川産の骨材が使用されていた可能性があった。この地域(富山県)の川砂および川砂利は、図-1に示すように、化学法(JIS A 1145)では無害と判定されても、JR東日本による判定基準では準有害と判定されるものがほとんどである。また常願寺川産の陸砂利はASTM C 289の「潜在的有害」領域の区分線上にプロットされ、通常の品質管理(半年に1回の試料検査)

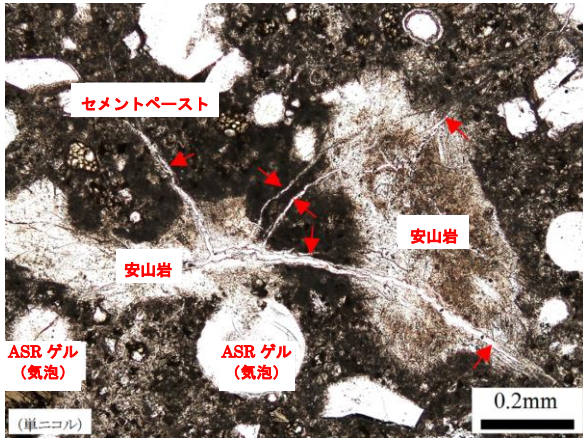


写真-10 CPTの偏光顕微鏡による観察結果  
(川砂・石灰石碎石)(ひび割れがモルタルに進展)

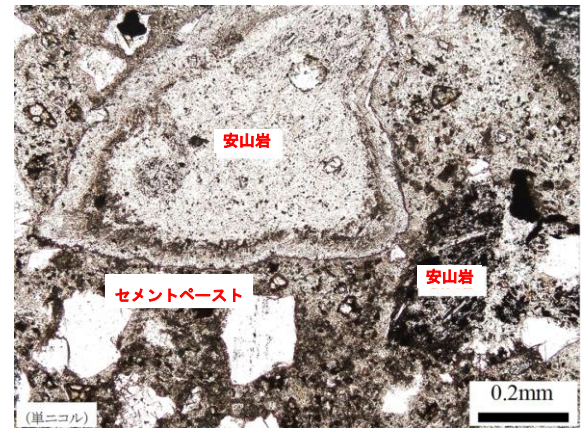


写真-11 CPTの偏光顕微鏡による観察結果  
(川砂・川砂利)(反応環あり, ひび割れなし)

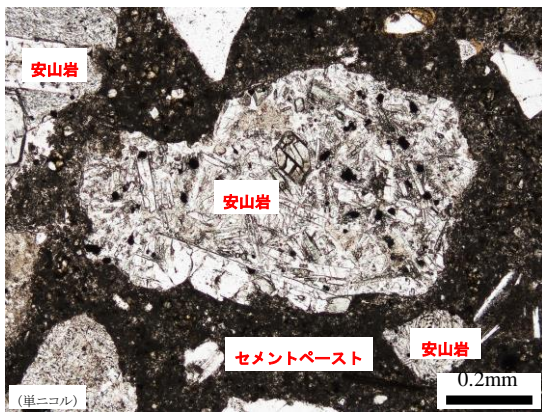


写真-12 CPTの偏光顕微鏡による観察結果  
(川砂・石灰石碎石(FA15%))(反応なし)

表-3 偏光顕微鏡観察によるASR劣化度の判定結果  
および判定基準<sup>7)</sup>

試験体の種類	OPC	FA15%
川砂・川砂利	I	0 または I
川砂・石灰石碎石	IV	0 または I
石灰石砕砂・川砂利	III	0 または I

分類	ひび割れの発生および反応状況
0	反応なし
I	反応リムの形成と骨材周囲へのASRゲル/ゾルの滲出
II	骨材粒子内部にASRゲルに充填された膨張ひび割れの形成
III	骨材粒子からセメントペーストへのASRゲルに充填された膨張ひび割れの進展
IV	連続的ひび割れ網の形成とASRゲルの気泡への浸入

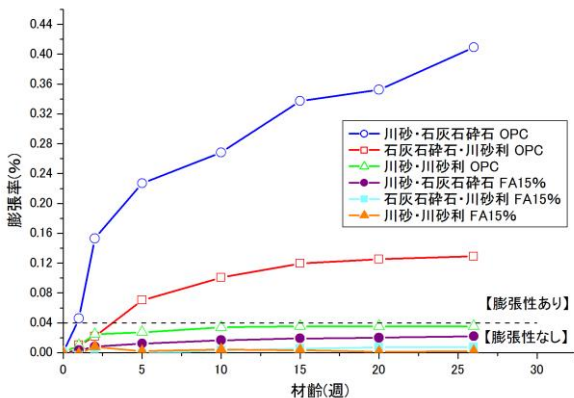


図-2 常願寺川骨材を使用したCPTの試験結果

では骨材の反応性を正確に判定できないことが問題であった。コンクリート片(事例IV)の偏光顕微鏡による観察結果を写真-9に示す。川砂中の安山岩粒子が反応しており、骨材からの膨張ひび割れの進展が観察された。富山県の河川産骨材の事例のように、クリストパライトやオパールを含有する火山岩粒子が混入する場合には、組成ペシマム現象が顕著に現れるので、化学法(JIS A 1145)で「無害」と判定された骨材でもASRが実際に発生することに十分な注意が必要であった。本PCa製品は

フライアッシュによるASR抑制対策が平成27年度に完了した<sup>9)</sup>。

#### 4. CPTによる細・粗骨材の組み合わせによる組成ペシマム現象の検証

常願寺川産骨材を使用したCPT(材齢26週)の試験結果を図-2に示す。ここでは、カナダの基準(CSA)を参考にして、コンクリートの膨張率0.04%以上を「有害」と「無害」との閾値としている。コンクリートの膨張率は川砂・川砂利<石灰石砕砂・川砂利<川砂・石灰石碎石の順番で大きくなり、3.の事例IIおよび事例IIIで示されたような、細・粗骨材の組み合わせによる組成ペシマムの影響を確認することができた。また、フライアッシュコンクリート(置換率:15%)のものはいずれの細・粗骨材の組み合わせにおいても膨張率が0.04%以下、すなわち「無害」までコンクリートの膨張率を大きく低

減できた。当然ながら、細・粗骨材の組み合わせによる組成ペシマムはアルカリ量との関係で相違することになる。しかし、RILEM-AAR4と同量である、CPTで調整したアルカリ量(5.5kg/m<sup>3</sup>)は実際の構造物でのほぼ最大のものであると想定できることから、フライアッシュの使用は組成ペシマムをもつ川砂や陸砂のASR抑制対策として有効であることも確認できた。

CPT終了後のコンクリート片の薄片研磨試料の偏光顕微鏡による観察結果を写真-10および写真-11に示す。また、偏光顕微鏡観察によるASR劣化度の判定を表-2に示す。川砂・石灰石砕石の組み合わせは、とくに川砂が激しく反応しており、骨材からセメントペーストに多数のひび割れが進展していた。それに対して、川砂・川砂利の組み合わせでは骨材の一部(安山岩粒子)に反応環(リム)が確認される程度であり、軽微なASRと判定された。これは、川砂と川砂利がともに反応することにより、細孔溶液のアルカリレベル(OHイオン)が早期に閾値以下に低下したことによるものであった。また、写真-12に示すように、フライアッシュコンクリートはフライアッシュの周囲に生成したCSHによるアルカリの吸着作用による効果でいずれのものもASRが完全に抑制されていた<sup>10)</sup>。以上より、CPTによるコンクリートの膨張試験の判定結果と偏光顕微鏡観察によるASR劣化度の判定が良く一致していることが確認できた。

## 5. まとめ

本研究は、PC橋梁やPCa部材にて発生したASR劣化の特徴を偏光顕微鏡観察により検証するとともに、コンクリートの細・粗骨材の組み合わせによる組成ペシマム現象を実験的に確認した。

- (1) PC橋梁・PCa部材でのASR劣化の事例検証より、アルカリの総量規制値(3.0kg/m<sup>3</sup>以下)を満足するコンクリートでも、反応性が高い火山岩粒子やペシマムが顕著である川砂や陸砂を使用したコンクリートで実際にASRが発生していた。
- (2) CPTの膨張試験の結果より、細・粗骨材の組み合わせによる組成ペシマムの影響を確認することができた。また、フライアッシュコンクリート(置換率:15%)はいずれの細・粗骨材の組み合わせにおいても「無害」までコンクリートの膨張率を大きく低減できた。
- (3) CPTの膨張試験後の薄片観察の結果より、コンクリートの膨張率は川砂・石灰石砕石、石灰石砕砂・川砂利の組み合わせのほうが川砂・川砂利の組み合わせより大きくなった。これは、川砂と川砂利がともに反応することにより、細孔溶液のアルカリレベル

(OHイオン)が早期に閾値以下に低下したことによるものであった。

## 謝辞:

本研究は、金沢大学SIPWG2(ASR分科会)の研究活動の一環として取りまとめたものであり、関係各位に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) 大代武志, 鳥居和之: 富山県のASR劣化橋梁の実態調査に基づくASR抑制対策および維持管理手法の提案, コンクリート工学論文集, Vol.20, No.1, pp.45-57, 2009
- 3) 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劣化の事例検証, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.1, pp.1065-1070, 2008
- 4) 鳥居和之, 橋下徹: 今, 何故, 北陸地方でフライアッシュコンクリートなのか, セメント・コンクリート, No.810, pp.18-23, 2014
- 5) 田中暁大, 山田一夫, 佐川康貴, 小川彰一: コンクリートプリズムを用いたASR加速試験における養生温度およびアルカリ総量が膨張挙動に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.895-900, 2015
- 6) 日本コンクリート工学会 ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会: ASR 診断の現状とあるべき姿研究委員会報告書, 日本コンクリート工学会, 2014
- 7) Katayama, T., et al: Late-expansive ASR due to imported sand and local aggregates in Okinawa Island, southwestern Japan, Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Trondheim, Norway, pp.862-873, 2008
- 8) 木村嘉富, 和田圭仙, 青柳聖: ASRによりひび割れが生じたPC撤去桁の耐火性能, 土木技術資料, Vol.56, No.5, pp.18-21, 2014
- 9) 橋下徹, 金井滋, 広野真一, 鳥居和之: コンクリートポール電柱の耐久性向上に関する一考察, セメント・コンクリート, Vol.69, pp.221-228, 2016
- 10) Torii, K., et al: The Alkali-Silica Reactivity of Volcanic Aggregates and Its Preventive Measure Using Fine Fly Ash, Proc. of 14<sup>th</sup> EASEC, CD-R 10 pages, 2016