

## 論文 再生骨材コンクリートの ASR 抑制対策の検証

佐藤 良恵\*<sup>1</sup>・清水 和博\*<sup>2</sup>・杉山 彰徳\*<sup>3</sup>・鳥居 和之\*<sup>4</sup>

**要旨**：本研究では、ASR 劣化構造物より製造した再生骨材とその原骨材を使用して、再生骨材コンクリートの ASR に及ぼす原骨材の種類の影響を実験的に検討した。一連の ASR 試験の結果より、原骨材の ASR 進行度により再生骨材コンクリートの ASR も相違することが明らかとなった。また、混合セメントの使用による ASR 抑制効果を屋内促進養生試験と屋外暴露試験により検証した結果、再生骨材コンクリートの ASR 抑制対策としては JIS A5308 に準拠した、混合セメントの置換率では不十分であり、それらの置換率をさらに高める必要があった。

**キーワード**：再生骨材, 原骨材, アルカリシリカ反応性, ASR 抑制対策, 混合セメント

### 1. はじめに

再生骨材の利用に関しては、JIS A5021「コンクリート用再生骨材 H」(2005 年 3 月), JIS A5023「再生骨材 L を用いたコンクリート」(2006 年 3 月), JIS A5022「再生骨材 M を用いたコンクリート」(2007 年 3 月)がそれぞれ規格化されている。いずれの規格においても、再生骨材中の原骨材のアルカリシリカ反応性やその履歴は不明であること、不特定の発生箇所から搬入されたコンクリート塊から再生骨材が製造されること、などの理由により、再生骨材は JIS A5308 の区分 B の骨材、すなわちアルカリシリカ反応性が「無害でない」として、混合セメントによる ASR 抑制対策を実施することを基本としている。しかし、再生骨材の ASR を詳細に調べた研究は少なく、付着モルタル量や原骨材の ASR 進行度が再生骨材コンクリートの膨張挙動に及ぼす影響については不明な点が多いのが実状である<sup>1)</sup>。

本研究では、ASR 劣化構造物より作成した再生骨材(原骨材が安山岩砕石と川砂利)のアルカリシリカ反応性を比較検討した。また、再生骨材コンクリートの混合セメントの使用による ASR 抑制効果を調べるために、屋内促進養生試験および屋外暴露試験を実施した。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料

再生骨材 A は、建設後約 30 年が経過した ASR 劣化橋脚(能登有料道路の鹿島橋)の解体時に発生したコンクリート塊より製造した。この橋脚のコンクリートには、非反応性骨材である川砂と反応性骨材である安山岩砕石(両輝石安山岩、輪島市門前産)が使用されていた。能登半島北部で産出される安山岩砕石はアルカリシリ

カ反応性が高く、長期にわたり ASR 膨張が発生することが明らかとなっている<sup>2)</sup>。

再生骨材 B は、建設後約 34 年が経過した ASR 劣化橋脚(富山県の有澤橋)の解体時に発生したコンクリート塊より製造した。この橋脚のコンクリートには反応性骨材である富山県常願寺川産の川砂および川砂利が使用されていた。常願寺川産の川砂および川砂利には高い反応性を持つ安山岩粒子がペシマム値に近い割合で含有されていることが明らかとなっている<sup>3)</sup>。なお、再生骨材 A および B に使用された砕石および川砂利は採取場所が特定されており、同一の採取地より入手した砕石および川砂利を原骨材 A および B と称した。

再生骨材 A および B は JIS A5021「コンクリート用再生骨材 H」の規格に適合している。再生骨材の物理的性質と化学法の判定結果を表-1 に示す。

#### 2.2 実験方法

##### (1) 再生骨材および原骨材の岩石・鉱物学的特徴

再生骨材および原骨材の岩石・鉱物学的特徴を調べるために、使用骨材の粉末試料を使用して X 線回折分析を実施した。また、原骨材の ASR 進行度を調べるために、再生骨材 A および B より薄片を作成し、偏光顕微鏡観察を行った。さらに、同様の試料を使用して、波長分散型 X 線分析(EPMA)により再生骨材の界面領域の各元素(Si, Na, K, Ca など)の濃度分布を測定した。

##### (2) 再生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現行の化学法(JIS A1145-2001)とモルタルバー法(JIS A1146-2001, 温度 40°C, 相対湿度 100%)により調べた。さらに、外部よりアルカリが常に供給される厳しい養生条件である ASTM C1260(温度 80°C, 1N・NaOH 溶液に浸せき)お

\*1 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

\*2 石川県土木部 (正会員)

\*3 太平洋マテリアル(株) 開発研究所建設技術グループリーダー (正会員)

\*4 金沢大学大学院 自然科学研究科社会基盤工学専攻 教授 工博 (正会員)

よびデンマーク法（温度 50℃、飽和 NaCl 溶液に浸せき）を実施した。3 種類のモルタルバー法に使用したセメントは、普通ポルトランドセメント（密度：3.16g/cm<sup>3</sup>、ブレン値：3330cm<sup>2</sup>/g、等価アルカリ量：0.68%）である。

### (3) 再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応性試験

再生骨材コンクリート（75mm×75mm×400mm の角柱体）のアルカリシリカ反応性試験として屋内促進養生試験および屋外暴露試験を実施した。屋内促進養生試験における養生条件は、湿気槽養生法（NaOH または NaCl を Na<sub>2</sub>Oeq. がセメント質量の 2.0% となるように添加、温度 40℃、湿度 100%）、1N・NaOH 溶液浸せき法（温度 40℃）、飽和 NaCl 溶液浸せき法（温度 50℃）の 3 種類とした。測定項目は、コンクリートの膨張率および動弾性係数であり、試験開始から 7 日、28 日、その後は 1 ヶ月ごとに 12 ヶ月まで測定した。

コンクリートの配合を表-2 に示す。コンクリートに使用した骨材は、富山県早月川産の川砂（略号：S、絶乾密度：2.61g/cm<sup>3</sup>、吸水率：0.85%、化学法：「無害」、Sc=16mmol/l、Rc=21mmol/l）と再生骨材 A とその原骨材 A（略号：G）である。セメントは普通ポルトランドセメント（略号：OPC、密度：3.16g/cm<sup>3</sup>、ブレン値：3400cm<sup>2</sup>/g、等価アルカリ量：0.42%）を使用した。また、混和材による ASR 抑制効果を確認するために、フライアッシュ（略号：FA、密度：2.31g/cm<sup>3</sup>、ブレン値：4380cm<sup>2</sup>/g、等価アルカリ量：1.11%）および高炉スラグ微粉末（略号：BFS、密度：3.04g/cm<sup>3</sup>、ブレン値：4090cm<sup>2</sup>/g、等価アルカリ量：0.45%）を使用した。FA および BFS の置換率は JIS A5308（付属書 2）に準拠した FA15% または BFS42%（高炉セメント B 種、略号：BB）とさらに FA25% または BFS50% のものを比較検討した。

屋外暴露試験では、NaOH または NaCl を Na<sub>2</sub>O eq. がセメント質量の 2.0% となるように添加して、φ100×200mm の円柱供試体を作製し、千葉県佐倉市の屋外に暴

露した。暴露期間は 1 年 7 ヶ月（平成 18 年 2 月～平成 19 年 9 月）とし、暴露終了後に目視による外観観察とコンクリートの圧縮強度および静弾性係数測定を実施した。また、再生骨材は他の骨材と混合されて使用される場合が多いため、再生骨材の混合率を 100% および 50% のものを作製した。再生骨材の混合率 50% の供試体では富山県早月川産の川砂利（絶乾密度：2.66g/cm<sup>3</sup>、吸水率：0.71%、化学法：「無害」、Sc=21mmol/l、Rc=53mmol/l）を混合使用した。

## 3. 再生骨材の ASR に及ぼす原骨材の影響

### 3.1 原骨材の岩石・鉱物学的特徴

再生骨材 A および B の偏光顕微鏡観察の結果を写真-1 および 2 に示す。再生骨材 A は、斜長石、角閃石、輝石などの構成鉱物とともに、火山ガラスを多く含有していた。また、火山ガラスの風化・変質により生成するモンモリロナイトなどの粘土鉱物は確認されなかった<sup>4)</sup>。一方、再生骨材 B は、安山岩粒子やセメントペーストに多数のひび割れが発生していた。また、再生骨材 A および B ともに骨材内部のひび割れは ASR ゲルにより充填されていた。EPMA 分析の結果より、再生骨材 A は粒子界面から 1~2mm の領域で Si が減少しており、この領域が反応環（リム）に相当していた。すなわち、約 30 年が経過したコンクリートでも、緻密な安山岩砕石の反応領域は骨材界面から 1~2mm に限られていることがわかった。それに対して、再生骨材 B に含まれる安山岩粒子は、骨材内部まで Si が減少しており、ASR が骨材全体に進行していた。再生骨材 A および B はそれぞれガラス質安山岩（黒色）と結晶性安山岩（灰色）が主要なものであり、反応領域の相違は両者の ASR 反応性によるものと推察された。

### 3.2 再生骨材のアルカリシリカ反応性

#### (1) 化学法による判定結果

化学法（JIS A1145）の判定図（ASTM C289 の「潜在

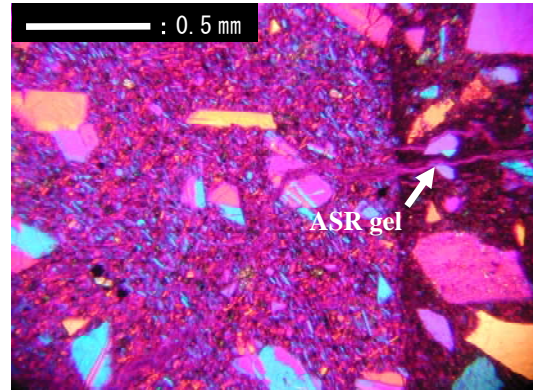
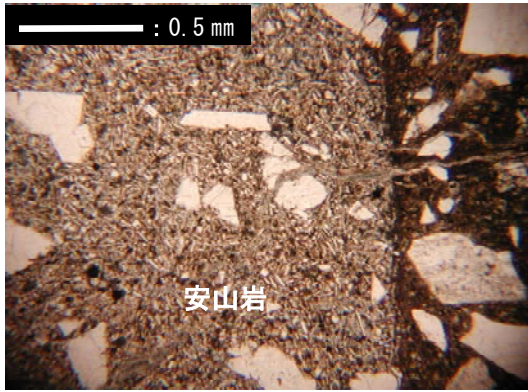
表-1 再生骨材およびその原骨材の物理的性質および化学法の結果

骨材の種類	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	化学法 (JIS A1145) *			反応性鉱物**
			Sc (mmol/l)	Rc (mmol/l)	判定結果	
再生骨材 A	2.51	2.7	152	155	無害	gl, Cr
原骨材 A	2.64	1.3	170	135	無害でない	gl, Cr
再生骨材 B	2.61	1.9	275	125	無害でない	gl, Cr
原骨材 B	2.63	1.6	353	68	無害でない	gl, Cr

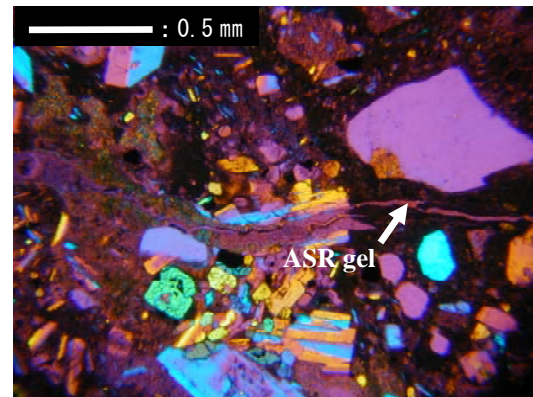
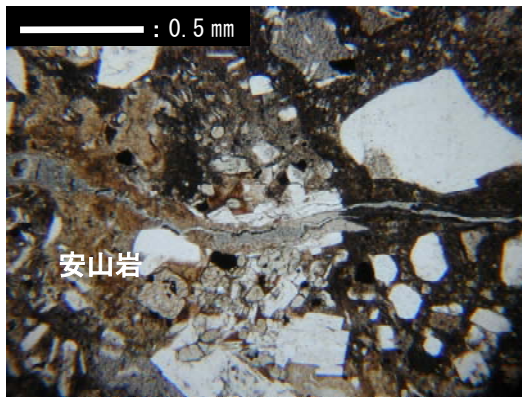
\* 塩酸処理無し      \*\* gl: 火山ガラス, Cr: クリストバライト

表-2 再生骨材コンクリートの配合

使用セメント	G <sub>max</sub> (mm)	空気量 (%)	スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					
						W	C	FA	BFS	S	G
OPC	25	2.0±1.0	10±2	50	46	160	320	0	0	879	993
FA15%							272	48	0	874	986
FA25%							240	80	0	869	1015
BFS42%							186	0	134	876	988
BFS50%							160	0	160	874	1023



単ニコル 直交ニコル（鋭敏色検板使用）  
写真-1 薄片の偏光顕微鏡観察の結果（再生骨材 A）



単ニコル 直交ニコル（鋭敏色検板使用）  
写真-2 薄片の偏光顕微鏡観察の結果（再生骨材 B）

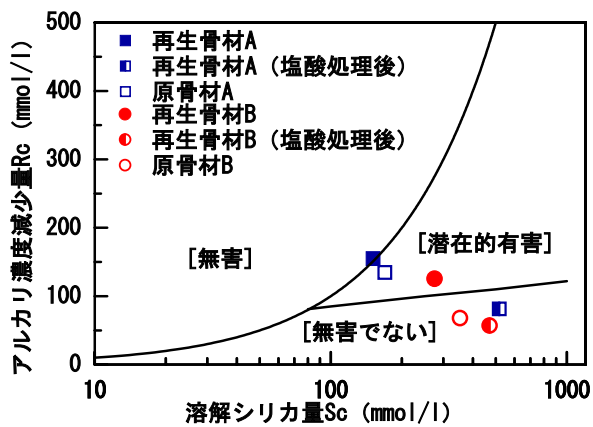


図-1 化学法の結果 (JIS A1145)

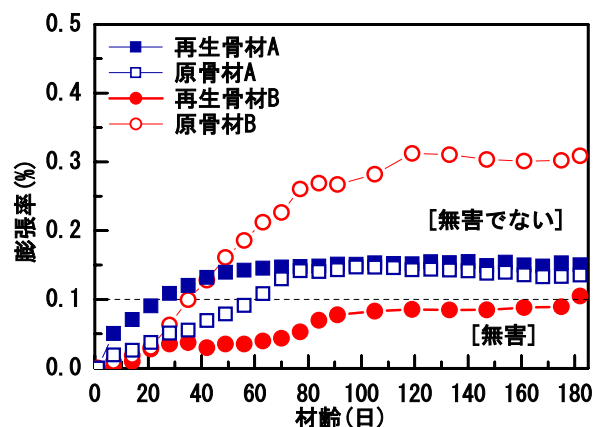


図-2 モルタルバー法の結果 (JIS A1146)

的有害」のラインを挿入)を図-1に示す。再生骨材 A および B は、原骨材と比較するとアルカリ濃度減少量 (Rc) が増大し、溶解シリカ量 (Sc) が減少する傾向がみられた。これは、再生骨材の付着モルタルには CSH gel および炭酸カルシウムが含有されており、OHイオンが CSH gel および炭酸カルシウムの分解に消費されることによるものである<sup>5)</sup>。一方、付着モルタルを塩酸で除去した再生骨材は、原骨材と比較してアルカリ濃度減少量 (Rc) が減少し、溶解シリカ量 (Sc) が増大した。岩月、森野は、再生骨材の溶解シリカ量が原骨材のそれより増大するものは残存反応性が高いと判断できることを指摘している<sup>6)</sup>。再生骨材 A は再生骨材 B と比較して塩酸処理後の溶解シリカ量 (Sc) が大きく増大した。これは、

再生骨材 A は反応性鉱物として火山ガラスを多く含むので、骨材中の火山ガラスが塩酸処理の影響を大きく受け、反応しやすくなったためだと推察される。

JIS A5021, 5022 および 5023 によると、再生骨材に化学法を適用する場合、希塩酸などの弱酸により付着モルタルを除去した後に試験を実施することと規定している。しかし、この際、酸処理骨材では付着モルタルまたは骨材の一部に酸が付着していると、アルカリ濃度減少量が増加し、「無害である」と判定される可能性が高くなる<sup>7)</sup>。したがって、破碎骨材を蒸留水に何回も浸せきし、酸の影響がないことを確認してから、化学法を実施する必要があった。

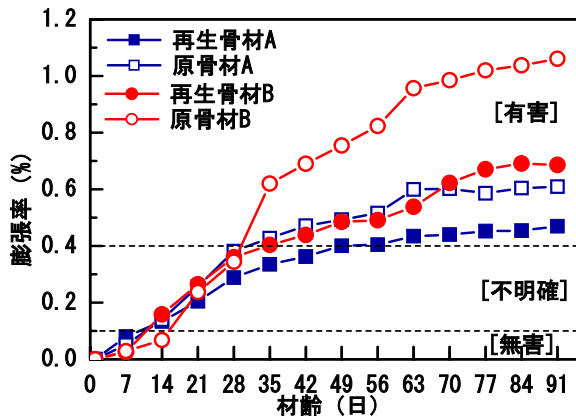


図-3 モルタルバー法の結果（デンマーク法）

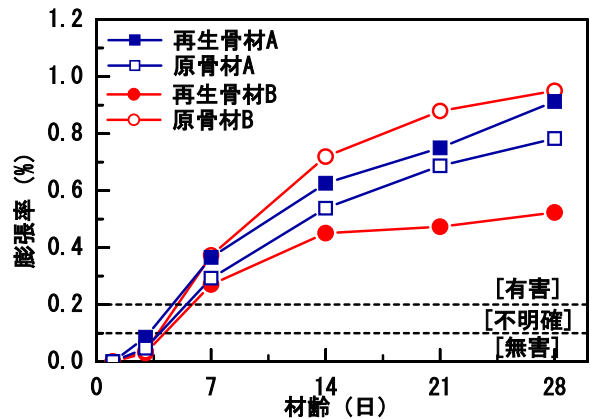


図-4 モルタルバー法の結果（ASTM C1260）

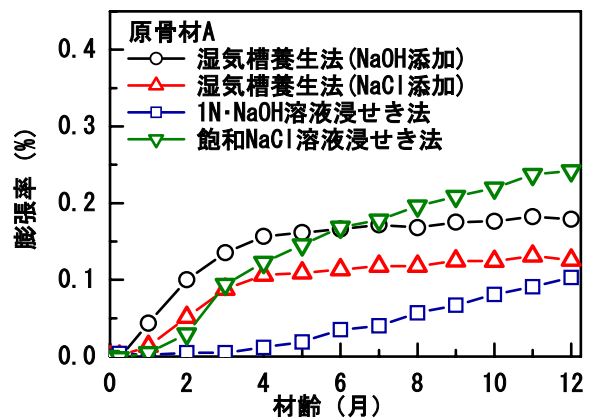
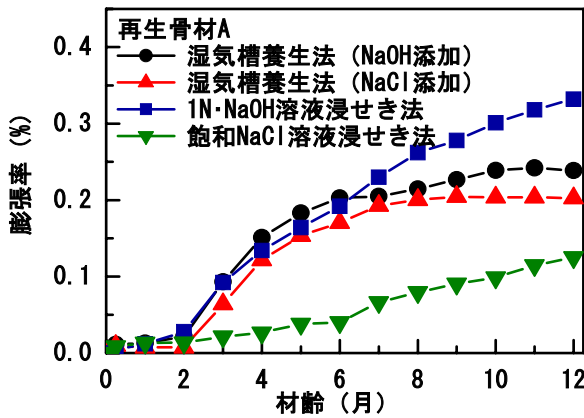


図-5 再生骨材および原骨材コンクリートの膨張挙動

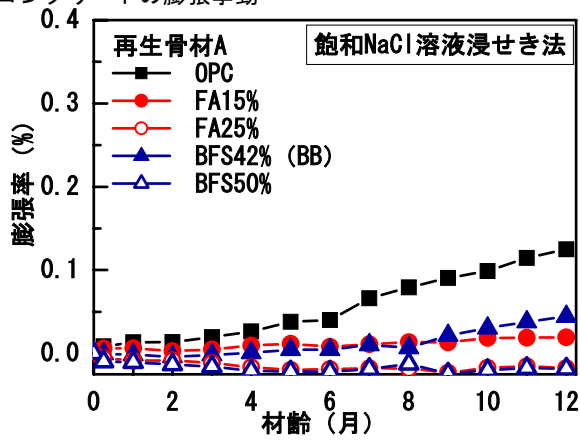
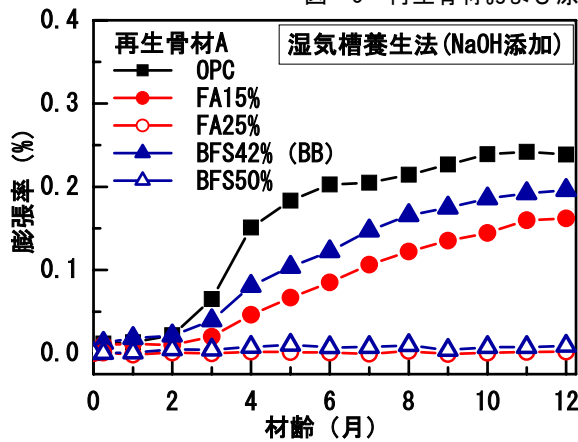


図-6 再生骨材コンクリートの混合セメントによるASR抑制効果

## (2) モルタルバー法による判定結果

3種類のモルタルバー法（JIS A1146、ASTM C1260 およびデンマーク法）における膨張挙動を図-2、3および4に示す。JIS A1146では、再生骨材Aおよびその原骨材A、再生骨材Bおよびその原骨材Bはすべて「無害でない」と判定された。一方、アルカリが外部より常時供給され、より厳しい養生条件であるASTM C1260およびデンマーク法では、全ての骨材の膨張率が大きく増大しており、同様にすべて「有害」と判定された。また、3種類のモルタルバー法の比較において、再生骨材Aおよびその原骨材Aのモルタルバーの膨張挙動はほぼ同じであり、アルカリシリカ反応性の判定結果も同一のものにな

った。モルタルバー法の試験では、骨材を破碎し、細骨材の粒度に調整したものを使用することが規定されている。そのため、再生骨材A（安山岩粒子の界面付近のみが反応しているのが特徴）では、破碎時に新たな未反応部分が現れるので、原骨材Aとの間でモルタルバーの膨張率に大きな相違が認められなかったものと考えられる。一方、再生骨材B（安山岩粒子が骨材内部まで反応しているのが特徴）とその原骨材Bでは3種類の試験法にて両者の膨張率に大きな相違がみられた。すなわち、原骨材Bでは、クリストバライトを含む安山岩粒子がペシマム値に近い割合で含有しているために、大きな膨張が発生しているが、再生骨材Bでは、安山岩粒子のクリ

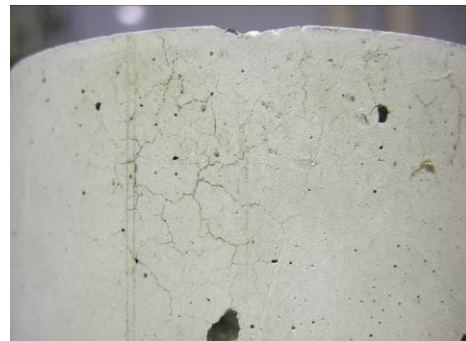


表-3 屋外暴露供試体の力学的性質の比較

再生骨材の混合率	添加アルカリの種類	セメントの種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	Ec/fc	超音波パルス速度 (m/sec)
100%	NaOH 添加	OPC	42.2	15.5	367	4610
		FA15%	43.7	22.1	506	4760
		BFS42%	40.8	19.4	474	4740
	NaCl 添加	OPC	57.0	27.8	487	4710
		FA15%	59.7	32.2	539	5090
		BFS42%	53.2	26.6	499	4730
50%	NaOH 添加	OPC	49.7	28.6	574	4700
		FA15%	49.8	25.7	515	4780
		BFS42%	48.6	28.4	584	4780
	NaCl 添加	OPC	64.0	33.3	520	4820
		FA15%	65.9	32.6	494	5120
		BFS42%	68.2	31.8	466	4950



OPC 使用



BFS 使用

写真-3 暴露試験体のひび割れ発生状況

ストバライトの一部がすでに反応していたために、原骨材 B と比較して残存膨張性が低下したものと推察される。以上の結果より、再生骨材の ASR 試験の判定結果は原骨材の種類とその反応状況により大きく相違することが明らかとなった。

#### 4. 再生骨材コンクリートの膨張挙動

促進養生試験における再生骨材コンクリート（再生骨材 A およびその原骨材 A を使用）の膨張率の変化を図-5 に示す。湿気槽養生法（NaOH または NaCl 添加）では、原骨材コンクリートは早期に膨張を開始し、材齢 4 ヶ月以後に膨張率がほぼ頭打ちになった。それに対して、再生骨材コンクリートは材齢 2 ヶ月以後に膨張を開始し、材齢 6 ヶ月以後に膨張率が同様に頭打ちになった。したがって、再生骨材を使用した場合には、骨材周囲の反応環と付着モルタルの影響により膨張の開始が遅れるが、その後の膨張挙動は原骨材のものと同様となることが判明した。しかし、再生骨材コンクリートにおいては、再生骨材中の ASR ゲルの存在により骨材自身からアルカリが長期にわたり溶出するため、長期材齢では原骨材コンクリートよりも膨張率が増大した。一方、外部からアルカリが供給される 1N・NaOH 溶液浸せき法および飽和 NaCl 溶液浸せき法では、促進養生の条件によりコンクリートの膨張挙動が大きく相違した。これは、促進養生におけるアルカリ溶液の浸透性とコンクリート内

部で形成されるアルカリ雰囲気の違いにより再生骨材の反応性が異なることによるものと推察される。

#### 5. 混合セメントによる ASR 抑制効果の検討

##### 5.1 屋内促進養生試験の結果

混合セメントを用いた再生骨材コンクリートの屋内促進養生試験における膨張率の変化を図-6 に示す。湿気槽養生法（NaOH 添加）では、OPC 単味と比較して FA15%および BFS42%（BB）はコンクリートの膨張が低減されているが、材齢 3 ヶ月以後の長期になると膨張が発生し、実際に ASR によるひび割れが観察された。一方、FA25%および BFS50%では長期材齢においても膨張はまったく発生しなかった。また、外部からアルカリが供給される飽和 NaCl 溶液浸せき法では、FA15%および BFS42%のものは材齢 6 ヶ月までは膨張がまったく発生しなかった。これは、促進養生期間中に FA のポズラン反応および BFS の潜在水硬性が進行することにより緻密な内部組織が形成された結果、外部からのアルカリ溶液の浸透が抑制されたことによるものである。しかし、長期材齢になると、コンクリートの膨張が始まり、材齢 12 ヶ月にて 0.04%程度の膨張率になった。一方、置換率を高めた FA25%および BFS50%のものは材齢 12 ヶ月においてもまったく膨張がみられなかった。以上の結果より、反応性の高い再生骨材（原骨材が安山岩砕石）は、現行の ASR 抑制対策（JIS A5308）に規定されているフ

ライアッシュ置換率15%または高炉スラグ微粉末置換率40%では不十分であり、さらに高い混合率の混合セメントを選択することが必要であった。

## 5.2 屋外暴露試験の結果

混合セメントを用いた再生骨材コンクリートの屋外暴露試験の結果を表-3 および写真-3 に示す。暴露期間1年7ヵ月において、セメントの種類に係わらず、すべての試験体にASRによるひび割れが観察できたが、ひび割れ発生状況はセメントの種類(OPC, FA15%, BFS42%)によって相違した。すなわち、OPC 供試体では、供試体の全面に亀甲状のひび割れが発生しており、ひび割れ幅が最大で0.6mmになった。それに対して、FA15%およびBFS42% 供試体は供試体の上部のみに微細なひび割れが発生していた。このことから、屋外暴露試験でも、反応性の高い再生骨材Aに対してはFA15%およびBFS42%による対策ではASRを完全に抑制できないことが確認された。また、同一のアルカリ量でもNaOHを添加したものはNaClを添加したものよりもひび割れが多く観察された。さらに、再生骨材の混合率が100%と50%のものとの比較では、100%のものが50%のものよりも顕著なASRのひび割れが観察された。これらの結果は屋内促進養生試験の結果ともよく対応しており、屋内促進養生試験により実際の環境条件下でのASRの進行状況を的確に評価できるものと考えられた。

屋外暴露供試体の測定結果を示した表-3 より明らかなように、いずれの供試体も圧縮強度は40N/mm<sup>2</sup>以上の値が得られており、ASRの進行による圧縮強度の大きな低下は認められなかった。これは、暴露期間1年7ヵ月程度ではASR劣化による損傷度が局部的であるためであった。しかし、ASRによるひび割れが最も顕著であったOPC 供試体(再生骨材100%, NaOH添加)は圧縮強度とともに静弾性係数の大きな低下がみられた。

## 6. 結論

ASR劣化構造物より作成した再生骨材(原骨材が安山岩砕石と川砂利)のアルカリシリカ反応性とASR抑制対策を検討した結果をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 建設後、約30年を経過した構造物において、能登産の安山岩砕石の反応領域は骨材界面から1~2mm程度に限定されていたが、常願寺川産の川砂利中の安山岩粒子は骨材内部まで反応が進行していた。
- (2) 再生骨材のASR試験の結果より、再生骨材のアルカリシリカ反応性は原骨材の種類(能登産の安山岩砕石および常願寺川産の川砂利)とで大きく相

違した。

- (3) 再生骨材コンクリートの屋内促進養生試験の結果より、再生骨材コンクリートは付着モルタルと骨材周囲の反応環の影響により膨張の開始が遅れたが、その後の膨張挙動は原骨材を用いたコンクリートとほぼ同様であった。
- (4) 再生骨材の混合セメントによるASR抑制対策としては、JIS A5308の規定よりもさらに高い置換率(FA25%またはBFS50%)が必要であった。
- (5) 再生骨材コンクリートのASRの評価に関して、屋内促進養生試験と屋外暴露試験との結果はよく対応していた。

## 謝辞

本研究の実施にあたりご協力いただいた、石川県道路公社、(株)北川物産および(株)小野田ケミコに感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Nielsen, A., Gottfredsen, F. and Thøgersen, F.: Recycling of Concrete with Alkali-Reactive Aggregate, Proc. of 9th Inter. Conf. on Alkali-Aggregate Reaction, pp.706-711, 1992.
- 2) 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, Vol.64, No.767, pp.185-197, 2004.
- 3) 富山県生コンクリート工業組合・耐久性向上委員会: 富山県における反応性骨材(輝石安山岩)のペシマムについて, 生コン技術大会論文集, pp.13-18, 1995.
- 4) 鳥居和之, 樽井敏三, 大代武志, 平野貴宣: 能登半島のASR劣化構造物に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.779-784, 2006.
- 5) 黒田泰弘: 再生骨材のアルカリシリカ反応性に関する基礎的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東), A-1分冊, pp.645-646, 2006.
- 6) 岩月栄治, 森野奎二: 長期間貯蔵したコンクリートから取り出した骨材のアルカリシリカ反応に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.1, pp.799-804, 2005.
- 7) 土木学会コンクリート委員会: 電力施設解体コンクリートを用いた再生骨材コンクリートの設計施工指針(案), コンクリートライブラリー, No.120, pp.166-177, 2005.