

# 論文 再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応に対するフライアッシュによる抑制効果

溝口 信夫\*1・舘 秀基\*2・金子 雄一\*3・道正 泰弘\*4

**要旨**：再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応抑制対策としてのフライアッシュの使用について、実験的検討を行った。実験は、無害でない粗骨材を用いて作製した原コンクリートから製造した再生骨材を用い、フライアッシュの添加の有無による反応性の差異について検討した。検討の結果、再生骨材コンクリートにおける、フライアッシュによるアルカリシリカ反応の十分な抑制効果が確認できた。

**キーワード**：再生骨材コンクリート、骨材置換法、アルカリシリカ反応 (ASR)、フライアッシュ

## 1. はじめに

天然資源の保護、建設廃棄物の抑制等の観点から、建設工事における再生骨材コンクリートの使用の必要性が高まっている。このような情勢において、骨材置換法に基づく再生骨材コンクリート<sup>1),2),3)</sup>は、これまでに取得した4件の国土交通大臣認定に基づき、電力施設の建設に適用されている。最新の大臣認定 (MCON-2090, 平成21年6月9日取得) では、普通ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメント、高炉セメントB種に加え、普通ポルトランドセメントにフライアッシュを添加の4種類の結合材を適用対象としている。

電力施設の建設に使用した再生骨材コンクリートおよびこれから用いる予定の再生骨材コンクリートは、次の特徴を有しており、比較的低品質の再生骨材を使用するが、構造体コンクリートとしての適用が大臣認定において認められている。

- (1) 再生骨材は、自社の構造物の解体コンクリートから製造する。解体に際し、事前に原コンクリートの調査 (コア採取による調査や建設記録などの図書調査) を実施し、原コンクリートの性状を把握する。
- (2) 再生骨材の製造では、品質管理のために一定の製造ロットごとに骨材試験を行い、再生骨材が所要の品質を満足することを確認する。
- (3) さらに、再生骨材コンクリートの製造においても、再生骨材の受入れ検査や再生骨材コンクリートの品質管理のための試験を実施し、再生骨材コンクリートが所要の品質を満足することを確認している。

このように、原コンクリートの段階から、再生骨材を経て再生骨材コンクリートまで、3段階の調査や検査により、これらの性状を確認することとしており、工事に用いる再生骨材コンクリートの品質が確保される。

アルカリシリカ反応性についても、次章に示す考え方に基づき、再生骨材コンクリートに顕著なアルカリシリカ反応 (以下、ASR と記す) が生じないことを確認することとしている。しかしながら、確認のための試験には、長い試験期間を必要とするものも含まれ、再生骨材の製造ならびに工事の工程等の制約条件から、十分な確認ができない場合も想定される。そのような場合には、確実な ASR の抑制対策を講じることで、このような試験による確認を省略できることとし、フライアッシュ添加による抑制対策を適用することとする。

本論文では、このような ASR 抑制対策の効果を確認するために実施した検討内容に基づき、再生骨材コンクリートの ASR に対するフライアッシュによる抑制効果について示す。

## 2. 再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応に対する考え方

電力施設の建設に用いる再生骨材コンクリートでは、原コンクリート調査、再生骨材製造および再生骨材コンクリート製造時の受入検査の3段階において、ASR が生じないことを確認することとしている。

### 2.1 原コンクリート調査段階

原コンクリート調査の段階では、次の事項を確認する。

- ・解体する構造物に ASR によると考えられるひび割れ等が生じていない。
- ・採取したコアの骨材切断面等の観察により、粗骨材周囲に反応リムやゲルがないことを確認する。
- ・骨材のアルカリシリカ反応性試験方法 (迅速法 JIS A 1804) により、「無害」と判定される。

### 2.2 再生骨材製造段階

再生骨材製造の段階では、次の事項を確認する。

---

\*1 東電工業 (株) 土木建築本部 建築グループ (正会員)  
 \*2 東京電力 (株) 建設部 土木・建築技術センター 建築構造技術グループ (正会員)  
 \*3 東電設計 (株) 土木本部 原子力・火力土木部 設計第二グループ 工修 (正会員)  
 \*4 東京電力 (株) 建設部 土木・建築技術センター 博士(工学) (正会員)

- 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（迅速法 JIS A 1804）により、「無害」と判定される。
- 上記試験で「無害でない」場合には、JASS 5N T-603 コンクリートの反応性試験方法により、反応性なしとなることを確認する。

### 2.3 再生骨材コンクリート製造段階

再生骨材コンクリートの製造においては、次の事項を確認する。

- 骨材のアルカリシリカ反応性試験方法（化学法 JIS A 1145 またはモルタルバー法 JIS A 1146, 迅速法 JIS A 1804）により、受入れた再生骨材のアルカリシリカ反応性が「無害」であることを確認する。なお、骨材製造における検査で、JASS 5N T-603 により反応性のないことが確認されている場合には、これらの試験結果に関係なく使用できる。
- 再生骨材コンクリートの調合において、総アルカリ量が  $3.0\text{kg/m}^3$  以下となるようにする。
- 製造した再生骨材コンクリートに対し、コンクリートのアルカリシリカ反応迅速試験方法 ZKT-206 による試験を実施し、「反応性なし(A)」となることを、工事開始前に確認する。

### 3. 再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応に対するフライアッシュの抑制効果の確認

#### 3.1 反応性を有する再生骨材の製造

フライアッシュによる再生骨材コンクリートの ASR の抑制効果を実験により確認するためには、反応性を有する再生骨材が必要である。そこで、反応性を有する粗骨材（以下、反応性粗骨材と記す）を用いたコンクリートを作製し、それを破碎、分級して反応性を有する再生骨材（以下、反応性再生骨材と記す）を製造した。

反応性再生骨材の製造に用いたコンクリートの調合等を表-1 に、反応性粗骨材および製造した反応性再生骨材の物性を表-2 に、それぞれ示す。表-2 に示すように、反応性粗骨材は、迅速法、モルタルバー法、化学法のいずれの試験法でも「無害でない」と判定され、十分な反応性を有していると考えられる。

反応性再生骨材は、この反応性粗骨材を用い、表-1 に示す調合でコンクリートを練混ぜて打ち込み、材齢 28 日以降に破碎して作製した。破碎したコンクリート塊を網ふるいでふるい分け、5~20mm を反応性再生粗骨材、5mm 以下のものを反応性再生細骨材とした。

反応性再生骨材の物性を表-2 に併せて示す。また、反応性粗骨材、反応性再生骨材のアルカリシリカ反応性

表-1 反応性再生骨材の製造に用いたコンクリートの調合等

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )					材齢 28 日 圧縮強度 ( $\text{N/mm}^2$ )
					水 W	セメント C	細骨材 S	反応性粗骨材 G	混和剤 A	
20	20±2.5	55.0	4.5±1.5	44.5	184	335	761	989	0.838 (C×0.25%)	36.8

表-2 反応性粗骨材および反応性再生骨材の物性

項目	試験方法	反応性粗骨材	反応性再生粗骨材	反応性再生細骨材
岩種	—	安山岩 ( $G_{\text{max}}=20\text{mm}$ )	—	—
表乾密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	JIS A 1109	2.68	2.42	2.27
絶乾密度 ( $\text{g/cm}^3$ )	JIS A 1110	2.63	2.28	2.04
吸水率 (%)	JIS A 1110	1.75	6.07	11.08
粗粒率	JIS A 1102	6.45	6.59	3.45
微粒分量 (%)	JIS A 1103	0.1	0.04	4.1
粒形判定実積率 (%)	JIS A 5005	59.5	56.6	52.5
すりへり減量 (%)	JIS A 1121	16.7	—	—
安定性 (%)	JIS A 1122	2.6	58.6	17.3
塩化物量 (%)	JIS A 5002	0.001	0.001	0.001
アルカリシリカ反応性	JIS A 1804	無害でない 相対動弾性係数 45.3%	無害でない 相対動弾性係数 49.8%	無害でない 相対動弾性係数 62.9%
	JIS A 1146	無害でない	無害でない	無害
	JIS A 1145	無害でない $R_C=146\text{ mmol/l}$ $S_C=527\text{ mmol/l}$	—	—

表-3 ASR 抑制効果確認のための試験の因子と水準

調合 No.	セメント種類	混和材 *1	W/C *2 (%)	反応性粗骨材置換率 (%)	反応性再生骨材置換率 (%)		混和剤種類	試験項目	
					粗骨材	細骨材		ZKT-206	JASS 5N T-603
1	N	-	50	100	0	0	高性能 AE 減水剤	○	-
2				0	50	0		○	○
3				0	30	30		○	○
4	N	フライアッシュ	50	100	0	0	高性能 AE 減水剤	○	-
5				0	50	0		○	○
6				0	30	30		○	○

\*1: フライアッシュは結合材の一部とはせず、砂の代替材として添加する。添加量は、セメントとフライアッシュの重量の合計に対して 20%以上、かつ 80 kg/m<sup>3</sup>以上とする。

\*2: フライアッシュの重量は含まない。

試験 (モルタルバー法 JIS A 1146) 結果を図-1 に示す。

反応性再生細骨材は、材齢 182 日 (6 ヶ月) においても、膨張率は 0.100% に達しておらず、アルカリシリカ反応性に対して「無害」と判定される。ただし、表-2 に示すように、迅速法 (JIS A 1804) の結果では相対動弾性係数が 62.9% となっており、「無害でない」の判定となっている。再生骨材の製造に用いた原コンクリートでは、粗骨材は反応性のあるものを使用した。そのため、反応性再生粗骨材には反応性粗骨材が十分に含まれるが、反応性再生細骨材には、反応性粗骨材に由来する分がそれほど含まれないことから、このような結果となったと考えられる。

反応性粗骨材および反応性再生粗骨材では、それぞれ材齢 56 日および 91 日で、ASR によるひび割れが生じており、また、材齢 182 日では膨張率が 0.100% をはるかに上回っており、いずれも十分な反応性を有している。

### 3.2 実験方法

ASR 抑制効果確認のための試験の因子と水準を表-3 に示す。調合 No.1~No.3 はフライアッシュを添加せず、調合 No.4~No.6 には添加した。これらの合計 6 種類のコ

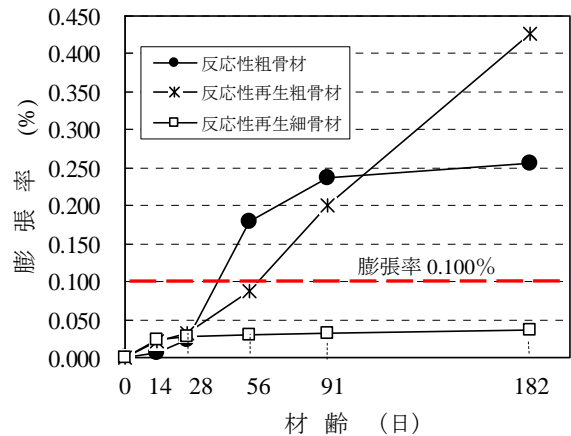


図-1 反応性粗骨材および反応性再生骨材のアルカリシリカ反応性試験結果 (モルタルバー法)

ンクリートに対し、ZKT-206 ならびに JASS 5N T-603 のアルカリシリカ反応性試験を実施した。

試験に供したこれらのコンクリートの調合を表-4 に示す。調合 No.1 および No.4 は、再生骨材を用いず、粗骨材に反応性粗骨材を用いた普通コンクリートとした。調合 No.2 および No.5 は、粗骨材の一部を反応性再生粗骨材で置換した再生骨材コンクリートとした。最新の大

表-4 試験に供したコンクリートの調合

調合 No.	G <sub>max</sub> (mm)	スランブ (cm)	W/C *1 (%)	空気量 (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )						混和材 *5 F	混和剤 *6 A
						水 W	セメント C	普通細骨材 *2 S	再生細骨材 *3 RRS	普通粗骨材 G	再生粗骨材 *4 RRG		
1	20	20±2.5	50	4.5±1.5	46.8	175	350	817	-	954 *7	-	-	2.28
2	20	20±2.5	50	4.5±1.5	46.8	175	350	817	-	480 *8	431	-	1.85
3	20	20±2.5	50	4.5±1.5	46.8	175	350	572	213	671 *8	259	-	1.75
4	20	20±2.5	50	4.5±1.5	43.5	175	350	715	-	954 *7	-	88	2.45
5	20	20±2.5	50	4.5±1.5	43.5	175	350	715	-	480 *8	431	88	2.05
6	20	20±2.5	50	4.5±1.5	43.5	175	350	501	186	671 *8	259	88	1.95

\*1: フライアッシュは結合材の一部とはしない。 \*2: 陸砂と砕砂 (ともに「無害」) を 7:3 (重量比) で混合した。

\*3: 3.1 に示した反応性再生細骨材を用いた。 \*4: 3.1 に示した反応性再生粗骨材を用いた。

\*5: 混和材はフライアッシュ (JIS A 6201 II 種) を用い、細骨材の代替材として添加した。添加量は、C+F の 20%以上かつ 80 kg/m<sup>3</sup>以上を満足するように設定した。

\*6: 混和剤は、高性能 AE 減水剤を用いた。 \*7: 3.1 に示した反応性粗骨材を用いた。

\*8: 石灰岩碎石と砂岩碎石 (ともに「無害」) を 7:3 (重量比) で混合した。

表-5 コンクリートのフレッシュ性状と圧縮強度試験結果

調査 No.	混和材 種類	反応性 粗骨材 置換率 (%)	反応性再生骨材 置換率 (%)		フレッシュ性状			圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
			粗骨材	細骨材	温度 (°C)	スランブ (cm)	空気量 (%)	7日	28日
1	—	100	0	0	20.0	19.5	5.1	33.9	44.1
2		0	50	0	19.8	20.5	4.4	31.3	41.8
3		0	30	30	19.4	19.5	5.0	29.6	40.0
4	フライ アッシュ	100	0	0	20.1	22.0	5.7	35.3	47.6
5		0	50	0	19.9	20.5	4.3	31.9	44.6
6		0	30	30	20.1	20.5	4.3	30.4	43.3

臣認定 (MCON-2090) における再生骨材コンクリートでは、粗骨材のみについてその一部を再生骨材で置換する場合には、置換率の上限を容積比で50%と規定しており、ここでは上限値である50%の置換率とした。調査 No.3 および No.6 は、粗骨材ならびに細骨材とも再生骨材を用いた再生骨材コンクリートとした。最新の大臣認定 (MCON-2090) における再生骨材コンクリートでは、再生粗骨材と再生細骨材を併用する場合には、再生粗骨材、再生細骨材の置換率の上限を、いずれも容積比で30%と規定している。ここでは、両者とも上限の置換率とし、いずれも30%とした。なお、再生骨材コンクリートで再生骨材と併せて用いる普通骨材は、アルカリシリカ反応性が「無害」のものを用了。

一般に、ASR ではペシマムの影響があり、ペシマムは骨材の反応性物質とアルカリ量の割合によって決定される。そこで再生骨材コンクリートでは、アルカリ添加量を変化させて試験を実施する JASS 5N T-603 の試験も併せて実施することで、ペシマムの影響も含めた抑制効果を確認することとした。

フライアッシュは、ASR の抑制対策として添加するが、結合材としては考慮せず、砂の代替材として調査した。最新の大臣認定 (MCON-2090) において、フライアッシュは、JIS A 6201 のⅡ種以上、またはそれと同等以上の品質を有するものをを用いることとしているが、ここでは JIS A 6201 Ⅱ種のものを用いた。また、添加量についても、最新の大臣認定 (MCON-2090) にしたがって、セメントとフライアッシュの単位量 C+F の20%以上、かつ80 kg/m<sup>3</sup>以上とした。フライアッシュによる ASR の抑制対策に関する指針等<sup>4), 5)</sup>では、C+F の15%以上のフライアッシュを添加することで、十分な ASR の抑制効果が期待できるとされているが、ここでは安全側に配慮することとし、上記のように添加量を規定している。

試験に供したコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度試験結果をまとめて表-5 に示す。これらの結果は、NaOH を添加しないコンクリートに対するものである。

フレッシュ性状は、いずれのコンクリートも打設時の温度は約20°Cであり、スランブおよび空気量は表-4 に示す値を満足した。

圧縮強度は、フライアッシュを添加しないコンクリートに比べて、フライアッシュを添加したコンクリートが高い結果となった。ここでは、フライアッシュは結合材の一部とせず、砂の代替材として添加している。しかしながら、フライアッシュにはポズラン反応によるコンクリートの強度を高める効果もあるため、このような結果となったと考えられる。また、フライアッシュの添加の有無に関わらず、調査 No.1, No.4 の普通コンクリートの方が、他の調査の再生骨材コンクリートより高い強度となった。これは、普通骨材に比べて品質の劣る再生骨材を用いているためである。これまでに取得した大臣認定の再生骨材コンクリートでは、再生骨材を普通骨材の一部として置換する場合の強度等の低下に対し、相対品質値法<sup>1)</sup>を適用し、それを補正するよう材料設計を行うこととしている。したがって、実際に用いる再生骨材コンクリートでは、普通コンクリートと同等以上の強度等を確保するため、普通コンクリートより低い水セメント比とすることとなる。ただし、ここでは、強度を等しくする条件とはせずに、水セメント比を等しく設定したことから、このような結果となった。

アルカリシリカ反応性の試験は、「コンクリートのアルカリシリカ反応性迅速試験方法 ZKT-206」および「JASS 5N T-603 コンクリートの反応性試験方法」に準じて実施した。

### 3.3 実験結果

アルカリシリカ反応性迅速試験 (ZKT-206) の試験結果を表-6 に示す。調査 No.1, No.2 では、相対動弾性係数が80.0%未満となっており、「反応性なし(A)」と判定できないが、それ以外の調査ではいずれも「反応性なし(A)」と判定される。本試験では、相対動弾性係数が80.0%未満の場合には添加アルカリ量を6 kg/m<sup>3</sup>にして再試験することとされているが、ここでは再試験を実施していないことから、「反応性なし(B)」および「反応性あり」

表-6 コンクリートのアルカリシリカ反応性迅速試験結果 (ZKT-206)

調合 No.	混和材種類	反応性粗骨材置換率 (%)	反応性再生骨材置換率 (%)		試験結果				判定
			粗骨材	細骨材	一次共鳴振動数 (Hz)		相対動弾性係数 (%)		
					煮沸前	煮沸後	試験値	平均値	
1	-	100	0	0	7664	6825	79.3	79.4	— *1
					7366	6583	79.9		
					7752	6885	78.9		
2	-	0	50	0	7596	6795	80.0	79.7	— *1
					7894	7041	79.6		
					7935	7072	79.4		
3	-	0	30	30	8717	7998	84.2	84.7	「反応性なし(A)」
					8704	8038	85.3		
					8691	7998	84.7		
4	-	100	0	0	7428	7094	91.2	89.3	「反応性なし(A)」
					7106	6687	88.6		
					7325	6879	88.2		
5	フライアッシュ	0	50	0	9294	8776	89.2	89.5	「反応性なし(A)」
					9205	8652	88.3		
					9009	8593	91.0		
6	-	0	30	30	8760	8488	93.9	93.6	「反応性なし(A)」
					8739	8452	93.5		
					8890	8589	93.3		

\*1: アルカリ量を  $6 \text{ kg/m}^3$  とし再試験を実施していないため、「反応性なし(B)」、「反応性あり」の判定は困難であるため、ここでは「反応性なし(A)ではない」という判定とする。

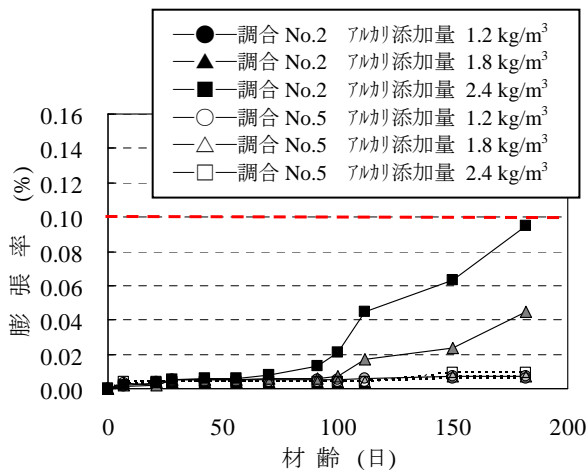


図-2 コンクリートの反応性試験 (JASS 5N T-603) 結果 (調合No. 2, No. 5)

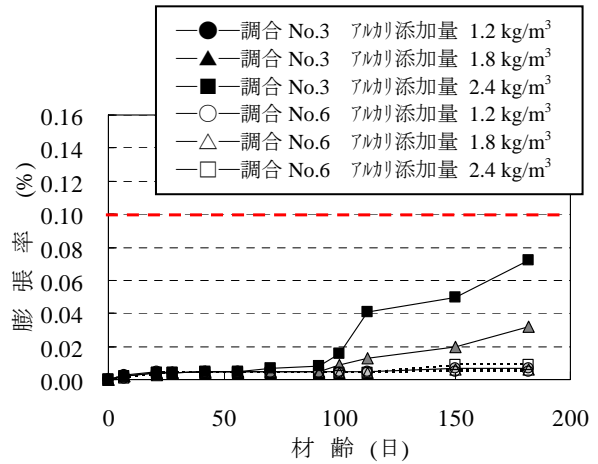


図-3 コンクリートの反応性試験 (JASS 5N T-603) 結果 (調合No. 3, No. 6)

の判定は困難である。しかしながら、試験に供した普通コンクリート (調合 No.1, No.4), 再生粗骨材のみを用いた再生骨材コンクリート (調合 No.2, No.5), 再生粗骨材と再生細骨材を用いた再生骨材コンクリート (調合 No.3, No.6) では、いずれもフライアッシュを添加することで、相対動弾性係数が 10%程度高い結果となっており、フライアッシュによる ASR の抑制効果が認められる。

コンクリートの反応性試験 (JASS 5N T-603) の結果を、調合 No.2, No.5 について図-2 に、調合 No.3, No.6 について図-3 にそれぞれ示す。また、これらの結果の材齢 6 ヶ月のデータから臨界アルカリ量を図-4 に示すように求めた。

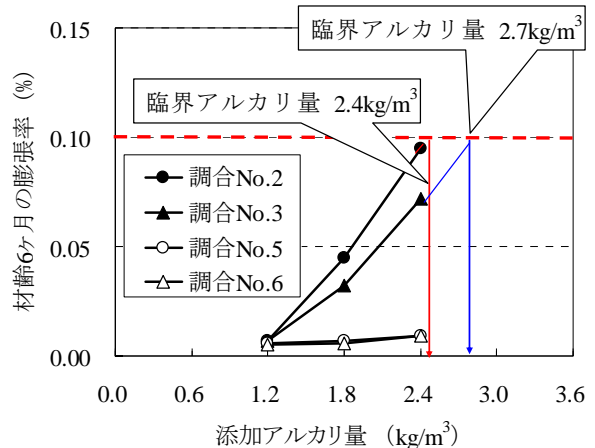


図-4 コンクリートの反応性試験 (JASS 5N T-603) 結果における臨界アルカリ量

表-7 コンクリートの反応性試験 (JASS 5N T-603) の判定結果

調合 No.	混和材の種類	反応性再生骨材置換率 (%)		臨界アルカリ量 (kg/m <sup>3</sup> )	判定
		粗骨材	細骨材		
2	—	50	0	2.4	反応性あり
3		30	30	2.7	反応性あり
5	フライアッシュ	50	0	>3.0	反応性なし
6		30	30	>3.0	反応性なし

コンクリート材齢 6 ヶ月における膨張率は、全てのコンクリートの、いずれのアルカリ添加量に対しても 0.1% 未満であることが、図-2, 3 より明らかである。しかしながら、フライアッシュを添加しないコンクリートでは、アルカリ添加量が増加すると材齢 6 ヶ月における膨張率も増加する傾向にある。それに対し、フライアッシュを添加したコンクリートでは、いずれのアルカリ添加量でも同様な膨張量となっており、フライアッシュによる ASR の抑制効果が認められる。

コンクリートの反応性試験 (JASS 5N T-603) の判定結果を表-7 に示す。本試験では、

(1) 材齢 6 ヶ月における膨張率が、いずれのアルカリ添加量においても 0.1% 未満であること。

(2) 材齢 6 ヶ月における臨界アルカリ量が、 $-1.2 \text{ kg/m}^3$  以下、または  $+3.0 \text{ kg/m}^3$  以上であること。

の両者を満足する場合には「反応性なし」とし、それ以外は「反応性あり」と判断する。ここでの結果では、試験に供した全ての調合 No. で(1)の条件は満足されているが、フライアッシュを添加しない調合 No.2, No.3 では、(2)の条件は満足されておらず「反応性あり」と判定された。それに対し、フライアッシュを添加した調合 No.5, No.6 では、(1), (2)のいずれの条件も満足しており、「反応性なし」と判定された。フライアッシュを添加しない場合には「反応性あり」となるコンクリートに対し、フライアッシュを添加すると「反応性なし」と判定されることから、再生骨材コンクリートの ASR に対するフライアッシュの抑制効果が確認できた。

#### 4. まとめ

再生骨材コンクリートの ASR に対するフライアッシュの抑制効果を確認するため、反応性を有する再生骨材を使用したコンクリートを用い、実験的検討を行った。その結果は以下のようにまとめられる。

(1) ZKT-206 の試験では、反応性の有無の判定において、フライアッシュによる ASR の抑制効果が明確とはならなかった。しかしながら、フライアッシュの添加の有無で、試験により得られる相対動弾性係数に 10% 程度の差が生じることが確認でき、フライアッ

シユが ASR を抑制することは明らかであると考えられる。

(2) JASS 5N T-603 の試験では、フライアッシュを添加しない場合には「反応性あり」と判定されるコンクリートが、フライアッシュを添加することにより「反応性なし」となることから、フライアッシュによる ASR の抑制効果は明らかである。なお、本試験は、アルカリ添加量を変化させることでペシマムの影響も考慮した試験方法となっており、本結果は、再生骨材の置換率がここで試験した条件と異なる場合にも、適用できると考えられる。

#### 謝辞

本検討の実施にあたり、(財)日本建築総合試験所 村上利憲博士に懇切なご指導を頂きました。また、東電設計(株) 村雄一氏、住友大阪セメント(株) 石川浩三氏および(株)中研コンサルタント 堀口浩司氏に多大なご協力を頂きました。ここにそのことを記し、厚く謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 道正泰弘, 植 知宏, 金子雄一, 小田部裕一: 骨材置換法による再生粗骨材コンクリートの建築構造物への適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp. 1493-1498, 2006
- 2) 館 秀基, 溝口信夫, 岡本英明, 道正泰弘: 骨材置換による再生骨材コンクリートの実構造物への適用, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1463-1468, 2010
- 3) 本田二義, 加藤 清, 館 秀基, 道正泰弘: 持続可能なコンクリート塊リサイクルシステム, 電気評論, 第 556 号 (第 95 巻第 12 号), pp.74-79, 2010.12
- 4) 日本建築学会: フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説, 2007.10
- 5) 土木学会: コンクリートライブラリー120 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), 2005.6