低品質再生骨材を用いたコンクリートのアルカリシリカ反応性の評価および抑制に関する研究

建築構造物の解体に伴い発生するコンクリート塊のリサイクルシステム

STUDY ON THE EVALUATION AND SUPPRESSION OF ALKALI-SILICA REACTION OF CONCRETE USING LOW-QUALITY RECYCLED AGGREGATE

Recycling system of concrete waste incurred from building demolition

道正泰弘 ——— * 1

キーワード：

低品質再生骨材, アルカリシリカ反応, フライアッシュ, 評価方法, 抑制方法

Keywords:

Low-quality recycled aggregate, Alkali-silica reaction, Fly ash, Evaluation method, Suppression method

Yasuhiro DOSHO ——— * 1

The purpose of this study is to increase the safe use of recycled aggregate concrete-Class M mixing with recycled aggregate class L and regular aggregate.

The evaluation results of recycled aggregate class L may differ depending on the sample pre-treatment method and testing method. Thus, it is necessary to perform quality control in combination with other tests.

As suppression methods, the specified value of total alkali amount can be satisfied by appropriate use of cement and admixture. In addition, the effect of alkali-silica reaction suppression by using a certain amount of fly ash type II was clearly recognized.

1. はじめに

再生骨材コンクリートのアルカリシリカ反応性については、原骨材が「無害」である場合には問題ないと判断できる。しかし、解体されるコンクリート構造物は一般的に古いため、「無害」であることの確認が困難なものも多い。特に、1986年に旧建設省から「アルカリ骨材反応対策に関する暫定指針」¹⁾が示されたが、この暫定指針の適用が推奨される以前の建築物では、多くの骨材がアルカリシリカ反応(ASR)の評価をされずに使われており、ASRを生じる骨材が使用されている可能性がある。

2018年に改正されたJIS A 5022[再生骨材コンクリートM]²⁾においては、用途拡大のために低品質な再生骨材Lと普通骨材の混合利用が認められたことから、ASRに対する各種試験方法の評価や抑制対策の方法については、幅を広げるとともに、より安全側に対応していく必要があるとしている。再生骨材コンクリートのASRの抑制対策は、使用する再生骨材がASRに関して「無害」であるものを用いる方法と、ASRに抑制効果のある混合セメントおよび混和材を使用する方法がある。ASR反応抑制効果のある混合セメントおよび混和材を使用することによりASRの抑制対策をとる場合は、JIS A 5022 附属書C(規定)[再生骨材コンクリートMのアルカリシリカ反応抑制

対策の方法]³⁾に準じると、コンクリートのアルカリ総量も考慮して単位セメント量を制限するなどの対策が必要となる。

本報告では、再生骨材Lと普通骨材を混合利用した再生骨材コンクリートMの安全な利用拡大を目的に、ASRの抑制対策としてアルカリ総量規制、ASRに対する各種試験方法の評価、フライアッシュの使用による抑制効果について検討を行った結果を示す⁴⁾。

2. アルカリ総量規制によるASRの抑制

2.1 アルカリ総量の試算

「再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針(案)」(本会指針)³⁾によると、再生骨材Lを普通骨材と混合利用して鉄筋コンクリート部材に用いる場合において、高炉スラグ(微粉末)やフライアッシュを用いた混合セメントおよび混和材の使用によりASR反応の抑制対策をとる場合は、計画調査および使用材料の試験成績書により、表1に示される条件に適合していることを確認することとしている。再生骨材コンクリートのアルカリ総量は、JIS A 5022 解説 4.7²⁾に示されている考え方にに基づき、1式により試算した。試算の条件は、再生骨材はセメントペーストを含む原コンクリートがそのまま骨材になったと仮定し、セメントのアルカリ量は、過去の生産

表1 本会指針における混合セメントおよび混和材の使用によるASRの抑制対策³⁾

アルカリ総量	使用セメントおよび混和材の制限
3.5 kg/m ³ 以下	高炉スラグが40%以上のJIS R 5211(高炉セメント)に適合する高炉セメントB種またはC種 [*] 、フライアッシュが15%以上混合されたJIS R 5213(フライアッシュセメント)に適合するフライアッシュセメントB種またはC種 [*] 、およびJIS A 6206(コンクリート用高炉スラグ微粉末)に適合する高炉スラグ微粉末を40%以上またはJIS A 6201(コンクリート用フライアッシュ)に適合するフライアッシュを15%以上混和材として混合したポルトランドセメントまたは普通エコセメントのいずれか。

※当該混和材の分量をセメントの試験成績表によって確認した上で、当該混和材を添加して所定の分量とした場合には、それぞれの条件に適合するセメントとして使用してよい。

¹⁾ 名城大学理工学部環境創造工学科 教授・博士(工学)
(〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

¹⁾ Prof., Dept. of Environmental Technology, Meijo Univ., Dr. Eng.

実績の最大値(0.95%)²⁾を用いた。なお、再生骨材中のペースト付着率は、JIS A 5022 解説図 3²⁾に示された再生骨材の吸水率とペースト付着率の関係における 95%信頼限界の上限値から、再生骨材中の全アルカリ量を算出した JIS A 5022 附属書 C(規定)の c.3 b), c) の式²⁾を用いて求めた結果、表 2 に示すように、再生粗骨材の吸水率 7%に対して 25%、再生細骨材の吸水率 13%に対して 50%となった。
 $R_t=OR_t+CR_t$ — 1 式

ここに、 R_t ：再生骨材コンクリート中のアルカリ総量 (kg/m³)
 OR_t ：原コンクリート起源のアルカリ量(kg/m³)-2 式
 CR_t ：新規に使用するセメント起源のアルカリ量(kg/m³)-6 式
 $OR_t=OR_c \times R_c \times V_r \times P_{ra}/P_{rb}$ — 2 式
ここに、 OR_c ：原コンクリート中の単位セメント量(kg/m³)

R_c ：原コンクリートに使用されたセメント中の全アルカリ量(%)
 V_r ：再生骨材コンクリート中の再生骨材の絶対容積割合(%) -3 式
 $V_r=V_{Gr} \times R_{Gr}+V_{Sr} \times R_{Sr}$ — 3 式

全骨材量の絶対容積割合を 70%、細骨材率(s/a)を 40%と仮定。
ここに、 V_{Gr} ：再生粗骨材を全量置換した場合のコンクリート中の再生粗骨材の絶対容積割合(%) 42%
 V_{Sr} ：再生細骨材を全量置換した場合のコンクリート中の再生細骨材の絶対容積割合(%) 28%
 R_{Gr} ：再生粗骨材置換率(%)
 R_{Sr} ：再生細骨材置換率(%)

P_{ra} ：試算によるペースト付着率(%) -4 式
 $P_{ra}=(100-s/a) \times P_{RLG}+s/a \times P_{RLS}$ — 4 式
 P_{rb} ：理論上のペースト付着率(%) -5 式

理論上のペースト付着率(P_{rb})は、表 3 に示す原コンクリートの調(配)合により、5 式により求めた。表 3 には、1975 年当時の実際の調(配)合例と、今後のコンクリート塊の利用を考慮し、現状の呼び強度の範囲である 30～36 までの調(配)合を想定した。なお、 P_{rb} の算定に用いた単位水量は、表 3 に示す現状(想定)の呼び強度での水セメント比を参考に、一律単位セメント量の 40%と仮定した。

$P_{rb}=(W+C)/(W+C+G+S)$ — 5 式
ここに、 W ：単位水量(kg/m³) $W=C \times 40\%$
 C ：単位セメント量(kg/m³)
 G ：単位粗骨材量(kg/m³)
 S ：単位細骨材量(kg/m³)

$CR_t=R_{c_{max}} \times CR_c$ — 6 式
ここに、 $R_{c_{max}}$ ：再生骨材コンクリート中の単位セメント量(kg/m³)
 CR_c ：新規に使用するセメント中の全アルカリ量(%)
 N ：0.6%、 FB ：0.5%(15%置換と仮定)

2.2 試算結果
本会指針 11.3. c³⁾に規定された置換率の範囲において再生骨材 L を用いたコンクリートのアルカリ総量を試算した結果を表 4 に示す。これによると、再生骨材コンクリート中の単位セメント量を 500 kg/m³とした場合においても、アルカリ総量の最大値が 3.5kg/m³を超えるのは、RLG を置換率 30%と RLS を置換率 15%で併用する場合で、かつ普通ポルトランドセメント(N)を使用した場合の 3.93kg/m³のみであるが、フライアッシュセメント B 種(FB)を使用することにより 3.5kg/m³以下となる。したがって、表 1 に示したように、使用セメントや混和材の使用制限を設けることにより、再生骨材 L を利用したコンクリートでも規定値を満足することができる。

3. 付着モルタル・付着ペーストの処理方法の影響
再生骨材Lの付着モルタル・付着ペーストの処理方法が評価結果に及ぼす影響について実験的な検討を行った。

3.1 アルカリシリカ反応性試験
実験に用いた原コンクリートの概要を表 5 に示す。なお、外観調査ではASRによる劣化現象は認められていない。再生骨材Lは多くの

表 2 再生骨材中のペースト付着率の試算結果				
骨材種類	吸水率 (%)	再生骨材中の全アルカリ量 算定式(JIS A 5022 附属書 C) ²⁾	ペースト付着率 (%)	
再生粗骨材 L:RLG	$Q_{rg}: 7$	$r_{rg}=0.025 \times 7+0.075$	$P_{RLG}: 25$	
再生細骨材 L:RLS	$Q_{rs}: 13$	$r_{rs}=0.033 \times 13+0.067$	$P_{RLS}: 50$	

表 3 原コンクリート調(配)合例※ ¹												
分類	呼び強度	G _{max} (mm)	W/C (%)	目標空気量 (%)	目標スランプ (cm)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					Prb (%)
							W	C※ ²	S※ ³	G※ ⁴	混和剤※ ⁵	
1975 年	210	25	58.0	3.0	5	42.3	146	252	819	1137	0.076	15.3
					18	41.3	175	302	751	1087	0.091	18.7
	240		53.0		5	41.8	146	275	801	1137	0.083	16.6
					18	40.5	176	332	725	1087	0.1	20.4
現状 (想定)	30	20	48.2	4.5	18	44.6	175	363	777	989	3.09	22.3
	33		45.0		18	43.3	182	404	720	988	5.05	24.8
	36		44.0		21	47.2	175	398	803	914	3.78	24.5

※1：実際のレディーミクストコンクリート工場の実績による。 ※2：普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³) ※3：1975 年当時は川砂の混合砂(表乾密度 2.60g/cm³)、現状は川砂を想定した。 ※4：1975 年当時は川砂利(表乾密度 2.65g/cm³)、現状は碎石を想定した。 ※5：1975 年当時はリグニン系 AE 剤、現状は AE 減水剤とした。

表 4 再生骨材 L を用いたコンクリートのアルカリ総量の試算結果														
原コンクリート					再生骨材コンクリート									
呼び強度	W/C (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	Prb (%)	s/a (%)	Pra (%)	置換率 (%)		Vr (%)	Rc _{max} (kg/m ³)	CRc (%)	アルカリ量 (kg/m ³)		
							RLG	RLS				原コンクリート起源:ORt	セメント起源: CRt	総量 Rt
21 ～ 36	44.0 ～ 58.0	5 18 21	3.0 4.5	15.3 ～ 24.8	40	粗骨材の全量が 再生骨材 L : 15.0	50	—	21.0	500	N :0.6	0.50	3.00	3.50
											FB:0.5		2.50	3.00
						細骨材の全量が 再生骨材 L : 20.0	—	30	8.4		N :0.6	0.26	3.00	3.26
											FB:0.5		2.50	2.76
						粗骨材・細骨材の全 量が再生骨材 L : 35.0	30	15	16.8		N :0.6	0.93	3.00	3.93
											FB:0.5		2.50	3.43

表 6 JIS A 1804 による測定結果

試験体		超音波伝ば速度率 (%)				相対動弾性係数 (%)				長さ変化率 (%)			
		測定値	平均	判定基準	判定	測定値	平均	判定基準	判定	測定値	平均	判定基準	判定
全粉砕	1	95.7	96	≧95 (伝ば距離:160mm)	無害	87.5	89	≧85	無害	0.043	0.04	0.1> (基長:160mm)	無害
	2	96.2				89.4				0.041			
	3	96.1				88.8				0.043			
塩酸処理	1	93.4	93		無害でない	78.6	77		無害でない	0.146	0.15		無害でない
	2	92.6				78.5				0.148			
	3	93.2				74.5				0.155			

付着モルタル・付着ペーストが含有されており評価結果に影響を及ぼす可能性がある。再生骨材コンクリートMのアルカリシリカ反応性の評価方法として、JIS A 5021附属書D[コンクリート用再生骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(再生骨材迅速法)]が規定されている。この方法は、JIS A 1804[コンクリート生産工程管理用試験方法—骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(迅速法)]を基本とし、ペシマム混合率の影響を考慮したものである。一方、JIS A 1804は、再生骨材Hを対象とした実験において、ペシマム条件をもつ反応性骨材に関しては、セメントペースト分は非反応性骨材と混合使用した場合と同様な働きをするとの報告がある⁴⁾。再生骨材Lでは、より多くのセメントペースト分が含まれるため、その影響を検討する必要がある。ここでは、付着モルタル・付着ペーストの処理方法が評価結果に及ぼす影響を把握することを目的に試験を実施した。

3.2 処理方法

表5に示す原コンクリートの解体コンクリート塊を用い、(1)破砕材を全粉砕する方法(全粉砕)、および(2)原粗骨材を塩酸処理により取り出す方法(塩酸処理)の2種類について検討した。

(1) 破砕材を全粉砕する方法

破砕材を全粉砕して試験する方法では、再生粗骨材の付着モルタル・付着ペーストの除去は行わず、破砕と分級により試料を作製した。本方法によると、骨材表面の付着モルタル・付着ペーストは全てが粉体となって失われるわけでない。このため、それが試験中に作用する懸念が残るが、実際の再生粗骨材には細骨材や付着ペーストも含まれており、再生粗骨材Lの評価としては、実態に近いものであると考えられる。処理手順は以下による。

①ジョークラッシャーにより破砕後、5mm ふるいにて分級、②ふるい通過分を水洗いにて微粒分除去後、105℃で一定量となるまで乾燥、③試料の所定量採取後に混合し、JIS A 1804 用の試料とする。

(2) 塩酸処理により原粗骨材を取り出す方法

塩酸処理を行って付着モルタル・付着ペースト分を除去して、原粗骨材の反応性を JIS A 1145[骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(化学法)]で評価する場合があるが、無害の骨材を有害と判定する可能性があることが指摘されている⁵⁾。これは、骨材中に粘土鉱物など微小鉱物が含まれるケースでは、塩酸処理の際に骨材表面のアルミナや鉄が溶出し、塩酸に溶けにくいシリカが残り、溶解シリカ量が増加するためと考えられており⁶⁾、JIS A 1804 においても影響する可能性がある。このため、事前に加熱すりもみ処理⁷⁾を行うことにより、可能な限り付着モルタル・付着ペーストを除去してから短期間の塩酸処理で原粗骨材を取り出すことにした。なお、この方法では付着モルタルが取り除かれるため、原細骨材の反応性については、判定をすることができない。塩酸処理の手順は以下による。

①破砕材(5～40mm)を電気炉にて200℃で5時間加熱、②ロッドミルを用いて、媒体比1:1にて5分間すりもみ(媒体は、D19の鉄筋を

表 5 原コンクリートの概要

項目	試験・確認方法	概要、測定値
用途	-	構造物基礎
経年	設計図書	約43年
原粗骨材種類	目視・設計図書	川砂利(5～40mm)
圧縮強度	JIS A 1107	60.1N/mm ² (平均)
静弾性係数	JIS A 1149	38.4kN/mm ² (平均)
中性化深さ	JIS A 1152	1.1mm(平均)
アルカリシリカ反応性	目視	有害なひび割れなし

表 7 反応性粗骨材および反応性再生骨材Lの主要品質

項目	試験方法	反応性粗骨材 ASRG	反応性再生粗骨材 L:ASRRLG	反応性再生細骨材 L:ASRRLS
岩種	—	安山岩 (G _{max} :20mm)	—	—
絶乾密度 (g/cm ³)	JIS A 1109	2.63	2.28	2.04
吸水率(%)	JIS A 1110	1.75	6.07	11.08
粗粒率 F.M.	JIS A 1102	6.45	6.59	3.45
微粒分量(%)	JIS A 1103	0.1	0.0	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 =146mmol/l S _c =527mmol/l	—	—

使用)、③5mm ふるいにて分級、5mm 以下を廃棄、④5%希塩酸に7日間浸漬後、原粗骨材採取、⑤水道水で洗浄後、水に2日間浸漬し、この後、(1)の処理手順①～③を実施した。

3.3 試験結果

測定は、超音波伝ば速度率、相対動弾性係数および長さ変化率の3種の測定方法について行った。これらの試験結果を表6に示す。いずれの測定方法も全破砕は「無害」、一方、塩酸処理は「無害でない」と評価が分かれる結果となった。

塩酸処理を行った骨材は、酸により付着モルタル・付着ペースト分が溶解するのみならず、骨材表面が酸に侵されてポーラスな状態になっているものと考えられる。そのため、できるだけ塩酸の影響が少なくなるように処理を行ったが、それにもかかわらず「無害でない」という結果となった。したがって、原粗骨材は反応性を有するものである可能性がある。一方、表6に示した全粉砕の破砕材自体による JIS A 1804 の評価結果は「無害」となった。これは原粗骨材に反応性があるとしても、それほど高いものではなく、原細骨材や付着ペースト分が増えることにより原粗骨材の割合が減少し、その結果として反応成分が減少したことが一因と考えられる。一方、

表8 反応性再生骨材 L の製造に用いた原コンクリートの調合および圧縮強度試験結果

G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					材齢 28 日圧縮 強度 (N/mm ²)
					W	C	S	ASRG	AE 減水剤※	
20	55	44.5	20±2.5	4.5±1.5	184	335	761	989	C×0.25%	36.8

※高変性ポリオール複合体

付着ペースト中にはアルカリ分が含まれており、原粗骨材だけの場合よりアルカリ量は大きくなることから、試料の調整方法により試験における骨材中の反応成分とアルカリ量の関係は微妙に変化しているものと考えられる。原粗骨材の反応性は「無害」とは断定できないが、付着モルタル・付着ペーストを含む破砕材を用いた試験結果が無害であることから、再生骨材として使用する上では、反応性を有する（「無害でない」）と判定される可能性は少ないと考えられる。しかし、試料の状態が異なる結果が得られたことから、付着モルタル・付着ペーストの処理方法が評価結果に及ぼす影響はあると考えられる。したがって、再生骨材 L を使用する場合には、一定のロットあるいは工程単位で試験を実施する、あるいは 4. で示すような他の有効な試験を併用した品質管理³⁾をするのが望ましい。

4. ASR に対する FAⅡの抑制効果の確認

4.1 反応性を有する再生骨材の製造

本検討では反応性を有する粗骨材(反応性粗骨材:ASRG)を用いた原コンクリートを作製し、それを破砕、分級して反応性を有する再生骨材 L(反応性再生骨材 L)を製造した。ASRG および反応性再生骨材 L の主要品質を表 7 に、反応性再生骨材 L の製造に用いた原コンクリートの調合および圧縮強度を表 8 にそれぞれ示す。表 7 に示すように、ASRG は、JIS A 1804, JIS A 1146[骨材のアルカリシリカ反応性試験方法(モルタルバー法)], JIS A 1145 のいずれの試験方法においても「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 L は、この ASRG を用い、表 8 に示す調合でコンクリートを練混ぜて打ち込み、材齢 28 日以降に破砕した。破砕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 L(ASRRLG)、5mm 以下を反応性再生細骨材 L(ASRRLS)とした。ASRG および反応性再生骨材 L の JIS A 1146 の結果を図 1 に示す。なお、試料は、再生骨材 L の実態に近い「3.2(1)破砕材を全粉砕する方法」により処理したものを用いた。

ASRRLS は、材齢 182 日で膨張率は 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 7 に示すように、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」との判定になっている。再生骨材 L 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。細骨材には ASR に対して無害のものを使用している。そのため、ASRRLG には ASRG が多く含まれるが、ASRRLS には ASRG を起源とする分の含有が少なかったことから、このような結果となったと考えられる。ASRG および ASRRLG 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いる。また、材齢 182 日では膨張率が 0.100%を大幅に上回っており、いずれも十分な反応性を有している。

4.2 実験方法および試料コンクリートの基本性能

(1) 実験の因子および水準、調合概要

本実験の因子および水準を表 9 に示す。調査 No. 1~No. 3 は N のみ、調査 No. 4~No. 6 には混和材として JIS A 6201 のフライアッシュⅡ種(FAⅡ)を使用した。これらの合計 6 種類のコンクリートに対し、

表 9 実験の因子および水準

調査 No.	セメント 種類	混和 材※1	W/C (%)	置換率 (%)			混和剤	試験項目	
				ASRG	ASRRLG	ASRRLS		ZKT-206	JASS 5N T-603
1	N	—	50	100	0	0	高性能	○	—
2				0	50	0	AE	○	○
3				0	30	30	減水剤	○	○
4	N	※2 FAⅡ	50	100	0	0	高性能	○	—
5				0	50	0	AE	○	○
6				0	30	30	減水剤	○	○

※1 砂代替利用。添加量:(C+FAⅡ)×20mass%以上、かつ 80kg/m³以上。※2 密度 2.24g/cm³、ブレン値 4400cm²/g、強熱減量 0.6%、湿分 0.1%

図1 反応性粗骨材および反応性再生骨材 L の試験結果 (JIS A 1146)

コンクリートバーによる「ZKT-206:コンクリートのアルカリシリカ反応性迅速試験方法」および「JASS 5N T-603:コンクリートの反応性試験方法」を実施した。コンクリートの調合概要を表 10 に示す。

調査 No. 1 および No. 4 は、反応性再生骨材 L を用いず、粗骨材に ASRG を用いた普通コンクリートとした。調査 No. 2 および No. 5 は、粗骨材の一部を ASRRLG で置換した再生骨材コンクリート M 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反応性再生骨材 L を用いた再生骨材コンクリート M とした。

JIS A 5022²⁾では、粗骨材についてその一部を再生骨材 L で置換する場合には、置換率の上限は容積比で 50%と規定しており、ここでは 50%の置換率を採用した。再生細骨材 L については、置換率の上限 30%と規定している。なお、本会指針³⁾においては、再生粗骨材 L および再生細骨材 L を併用して用いる場合の置換率の上限は、それぞれ容積比で 30%としている。本検討では、本会指針³⁾の上限の置換率を採用し、いずれも 30%とした。なお、再生骨材 L 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」のものを用いた。ペシマムの影響は、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 を実施することで、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 の抑制対策として使用することとし、結合材としての性能は考慮せず細骨材の一部と置き換えて使用する方法(砂代替)とした。また、使用量については、セメントと FAⅡの合計の単位量 (C+FAⅡ) の 20%以上、かつ 80kg/m³以上とした。「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」⁸⁾においては、FAⅡによる ASR の抑制対策は、FB 相当の 15%以上の使用、砂代替は、単位量を 80kg/m³以上使用することで、十分な ASR の抑制効果が期待できるとされているが、本検討では、砂代替としての利用において国土交通大臣認定の実績³⁾がある使用量を採用した。

表 10 コンクリートの調査概要

調査 No.	G _{max} (mm)	W/C (%)	s/a (%)	目 標 スランブ (cm)	目 標 空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)								
						W	C	S ^{※1}	ASRRLS	G ^{※2}	ASRG	ASRRLG	FAII (砂代替)	高性能 AE 減水剤 ^{※3}
1	20	50	46.8	20±2.5	4.5±1.5	175	350	817	—	—	954	—	—	2.28
2	20	50	46.8	20±2.5	4.5±1.5	175	350	817	—	480	—	431	—	1.85
3	20	50	46.8	20±2.5	4.5±1.5	175	350	572	213	671	—	259	—	1.75
4	20	50	43.5	20±2.5	4.5±1.5	175	350	715	—	—	954	—	88	2.45
5	20	50	43.5	20±2.5	4.5±1.5	175	350	715	—	480	—	431	88	2.05
6	20	50	43.5	20±2.5	4.5±1.5	175	350	501	186	671	—	259	88	1.95

※¹ 陸砂と砕砂を 7:3 で混合。 ※² 石灰岩砕石と硬質砂岩砕石を 7:3 で混合。 ※³ ポリカルボン酸エーテル系化合物と分子間架橋ポリマー複合体

表 11 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	置換率 (%)			フレッシュ性状			圧縮強度 (N/mm ²)	
		ASRG	ASRRLG	ASRRLS	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	FAII	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

表 12 ZKT-206 による判定結果

調査 No.	混和材 種 類	置換率 (%)			試験結果				判 定
		ASRG	ASRRLG	ASRRLS	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	「反応性なし(A)」ではない※
7366					6583	79.9			
7752					6885	78.9			
2		0	50	0	7596	6795	80.0	79.7	「反応性なし(A)」ではない※
7894					7041	79.6			
7935					7072	79.4			
3	FAII	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	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				

※アルカリ量を 6 kg/m³ とした再試験を実施していないため、「反応性なし(A)」ではないと評価とした。

(2) 試料コンクリートの基本性能

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表 11 に示す。これらの結果は、水酸化ナトリウム(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込み時の温度は約 20℃であり、スランブおよび空気量は目標値を満足した。圧縮強度は、FAII を使用しないコンクリートに比べて、FAII を使用したコンクリートが高い結果となった。ここでは、FAII は結合材の一部とせず、砂代替として使用しており、FAII にはポズラン反応による圧縮強度を増加させる効果があるため⁹⁾、このような結果が得られたといえる。また、FAII の使用の有無に関わらず、同じ水セメント比の調査 No. 1, No. 4 の普通コンクリートの方が、再生骨材 L を用いたものに対して高い強度となった。

4.3 実験結果

(1) ZKT-206

ZKT-206 による判定結果を表 12 に示す。調査 No. 1, No. 2 では、相対動弾性係数が 80.0%未満となっていたが、それ以外の調査ではいずれも 80.0%以上となっており「反応性なし(A)」と評価された。なお、ZKT-206 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 6kg/m³ にして再試験することが規定されているが、本検討では再試験を実施していないことから、「反応性なし(A)」ではないと評価した。普通コンクリート(調査 No. 1, No. 4), ASRRLG のみを用いた再生骨材コンクリート M(調査 No. 2, No. 5), ASRRLG と ASRRLS を用いた再生骨材コンクリート M(調査 No. 3, No. 6)では、いずれも FAII を使用することで、相対動弾性係数が 10%程度高い結果となっており、FAII による ASR の抑制効果が認められる。

(2) JASS 5N T-603

JASS 5N T-603 による材齢と膨張率の関係を図 2 に示す。また、材齢 6 ヶ月の結果から臨界アルカリ量を求めた結果を図 3 に示す。普通コンクリートでは、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、FAII を使用したコンクリートでは、いずれのアルカリ添加量でもほぼ同程度の膨張量となっており、FAII による ASR の抑制効果が認められる。

判定結果を表 13 に示す。FAII を使用しない調査 No. 2, No. 3 では、材齢 6 ヶ月における臨界アルカリ量が、-1.2 kg/m³ 以下、または+3.0 kg/m³ 以上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、FAII を使用した調査 No. 5, No. 6 では、「反応性なし」

と判定されたことから、再生骨材 L と普通骨材を混合利用した再生骨材コンクリート M の ASR に対する FA II の抑制効果が確認できた。

(3) 試験方法の比較による評価

ZKT-206, JASS 5N T-603 の結果から、一定量以上の FA II の使用による ASR の抑制効果が明確に認められた。試験方法の比較は、FA II を使用しない調合 No. 3 において、ZKT-206 では「反応性なし(A)」、JASS 5N T-603 では「反応性あり」と異なる結果となった。このことから、ZKT-206 については、JIS A 5022 解説 5.1.9²⁾に示されるような一定の条件下以外では、JIS A 5021 附属書 D と併用することで、総合的に精度の高い評価に寄与することが可能になると思われる。

5. まとめ

低品質な再生骨材 L を用いたコンクリートの ASR の評価ならびに抑制方法について検討を行った結果、以下のようなことがいえる。

- (1) 単位セメント量を 500kg/m³ とした場合において、アルカリ総量の最大値が 3.5kg/m³ を超えるのは、普通ポルトランドセメントを使用した再生粗骨材 L を 30%, 再生細骨材 L を 15% 置換した場合のみであったことから、使用セメントや混和材の適切な使用により、アルカリ総量の規定値を満足することができる。
- (2) JIS A 1804 では、試料の状態で判定が異なる結果が得られたことから、付着モルタル・付着ペーストの処理方法が評価結果に及ぼす影響はあると考えられる。したがって、再生骨材 L を混合利用する場合は、一定のロットあるいは工程単位で試験を実施する、あるいは他の有効な試験を併用した品質管理をするのが望ましい。
- (3) ZKT-206 において、FA II の使用の有無で、相対動弾性係数に 10% 程度の差が生じることが確認できたことから、FA II の ASR への抑制効果は明確に認められた。
- (4) JASS 5N T-603 の試験において、「反応性あり」と判定されるコンクリートが、FA II を使用することにより「反応性なし」となることから、FA II による ASR の抑制効果が明確に認められた。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、再生骨材 L の置換率が本検討で実施した条件と異なる場合にも、適用可能と考えられる。
- (5) 同一調合で ZKT-206 は「反応性なし(A)」、JASS 5N T-603 は「反応性あり」の結果となったものがあつたことから、ZKT-206 は、一定の条件下以外では、JIS A 5021 附属書 D と併用することで総合的に精度の高い評価に寄与することが可能になると思われる。

謝辞

本検討の実施にあたり、明治大学理工学部 小山明男教授に貴重なご助言を頂いた。また、元東電設計(株)村雄一氏、東京電力 HD 関係各位の多大なるご協力を頂いた。ここにそのことを記し、厚く謝意を表す。

参考文献

1) 建設省住宅局建築指導課長:コンクリートの耐久性確保に係る措置について、建設省住指発第 142 号, 昭和 61 年 2 月 2 日
2) 日本規格協会: JIS A 5022: 2018, 再生骨材コンクリート M, 平成 30 年 5 月 21 日改正
3) 日本建築学会:再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針(案), 2014
4) 黒田泰弘: 再生骨材のアルカリシリカ反応性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 1, pp. 1765-1770, 2009
5) 守屋進, 脇坂安彦, 河野広隆: 実構造物より採取した骨材のアルカリシリカ反応性試験(化学法)に関する一考察, セメント技術年報 41, pp. 427-430, 1987
6) 小林一輔編著: コンクリート構造物の耐久性診断シリーズ2 アルカリ骨材

図2 JASS 5N T-603 による材齢と膨張率の関係

図3 JASS 5N T-603 における臨界アルカリ量

表 13 JASS 5N T-603 の判定結果						
調合 No.	混和材 種類	置換率 (%)		膨張率 (%)	臨界アルカリ量 (kg/m ³)	判 定
		ASRRLG	ASRRLS			
2	—	50	0	0.1>	+2.4	反応性あり
3		30	30	0.1>	+2.7	反応性あり
5	FAII	50	0	0.1>	>+3.0	反応性なし
6		30	30	0.1>	>+3.0	反応性なし

反応の診断, p. 112, 森北出版, 1991
7) 古賀康男: 原子力発電所解体コンクリートからの骨材の分離技術, 放射性廃棄物研究 16, No. 2, pp. 17-25, 1996
8) 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
9) 道正泰弘, 峯秀和, 松本行平, 山本武志: フライアッシュを使用するコンクリートの強度寄与率に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 41 No. 1, pp. 221-226, 2019
10) 道正泰弘, 小山明男: 再生コンクリートの建築構造用コンクリートへの適用(その17. コンクリート中のアルカリ総量の評価), 日本建築学会大会学術講演梗概集(材料施工), pp. 489-490, 2015
11) 鴨下順二, 道正泰弘, 村雄一, 金子雄一: 大規模電力建物における再生骨材および再生コンクリートの利用(その41. 原コンクリートのアルカリシリカ反応性評価に関する一考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集(材料施工), pp. 203-204, 2009
12) 石川浩三, 道正泰弘, 溝口信夫, 堀口浩司: 大規模電力建物における再生骨材および再生コンクリートの利用(その44. 混和材としてのフライアッシュの利用), 日本建築学会大会学術講演梗概集(材料施工), pp. 209-210, 2009

注記

注) 本報告の一部は、日本建築学会大会において発表した^{10), 11), 12)}

[2019 年 10 月 2 日原稿受理 2019 年 11 月 22 日採用決定]