

論文 反応性骨材を用いたコンクリートからの高品質再生骨材の製造

黒田 泰弘^{*1}

要旨：反応性骨材を用いたコンクリートを対象に加熱すりもみ法による高品質再生骨材の製造実験を実施した。アルカリシリカ反応による劣化状況の異なるコンクリートから得られる再生骨材の品質を検討した結果、反応性骨材を用いたコンクリートからも、高品質の再生骨材が得られることがわかった。ただし、劣化したコンクリートから得られた再生粗骨材の粗粒率は他のものよりも小さくなる傾向が認められ、同じ処理時間における回収率も小さかった。原粗骨材界面で劣化が進行している影響と考えられる。

キーワード：アルカリシリカ反応、加熱すりもみ、高品質再生骨材、セメントペースト量

1. はじめに

昭和61年以前に建てられた建築物では多くの骨材がアルカリシリカ反応（以下、ASR）を評価されずに使われており、表面上劣化が認められないケースでも、反応性骨材が使われ、ASRを生じている可能性がある。しかしながら、そうしたコンクリートを対象とした再生骨材の検討はこれまで実施されておらず、再利用に関する知見は十分でない。

このため、本論文では、ASRによる劣化状況の異なるコンクリートを用いて、加熱すりもみ法¹⁾による高品質再生骨材の製造を実施し、劣化状況の違いが再生骨材の品質や回収率の変化に及ぼす影響について調べることにした。

2. 実験概要

2.1 原コンクリートの概要

(1) 原コンクリートの調査

原コンクリートの調査を表-1に示す。NX, N, B, Fは反応性骨材である粗骨材GA（粘板岩・頁岩碎石）と細骨材SA（流紋岩が混入した山砂）を、同一量使用したものであり、

N, B, FはASRによる膨張促進を目的として、水酸化ナトリウムを添加したものである。水酸化ナトリウムの添加量は、Nの単位セメント量（307kg/m³）に対してNa₂Oeq=2.5%とし、B, Fにも同量が添加されている。また、比較用のOには、反応性が無害とされる粗骨材GN（硬質砂岩碎石）と細骨材SN（山砂）が使用されており、水酸化ナトリウムは添加されていない。

原骨材の物理的性質を表-2に、迅速法（JIS A 1804）と化学法（JIS A 1145）の試験結果を表-3に示す。

表-1 原コンクリートの調査

記号	W/CM (%)	単位量 (kg/m ³)						NaOH
		C	BS	FA	W	S	G	
NX	58.6	307	0	0	180	786	999	無添加
N	58.6	307	0	0	180	786	999	添加
B	47.6	169	169	0	161	786	999	添加
F	48.8	262	0	66	160	786	999	添加
O	56.0	325	0	0	182	830	957	無添加

表-2 原骨材の物理的性質

記号	種類	粗粒率	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
GA	粘板岩・頁岩碎石	6.59	2.68	0.87
GN	硬質砂岩碎石	6.57	2.62	0.85
SA	山砂	2.17	2.50	3.10
SN	山砂	2.62	2.58	1.45

^{*1} 清水建設（株） 技術研究所生産技術開発センター 主任研究員 工修(正会員)

(2) 解体時の物性

解体コンクリートはいずれも他の目的で製作された試験体を譲り受けた。NX, N, B, F の試験体は梁状であり、寸法は 250×250×2,000mm, 主筋に D16 を 4 本配筋し、帯筋に D10 を 150mm 間隔で配筋したものである（軸方向の鉄筋比は 1.28%, 帯鉄筋比は 0.38%）。打込み後、約 30 ヶ月屋外曝露した後、温度 40℃, 湿度 90%RH 以上の促進条件で、試験体 NX, B, F は 6 ヶ月、試験体 N は 12 ヶ月養生されていた。

また、比較用の O の試験体は壁状であり、寸法は 150×300×500mm と 200×300×500mm, D13 の横筋 3 本と縦筋 4 本を、100mm 間隔でダブル配筋したものである。打込み後、20℃の恒温庫で 2 ヶ月、ビニールシートで封かん養生した後、屋内で 1 年以上、屋外に数ヶ月曝露されていた。

解体時のコンクリートの物性は表-4 のとおりである。反応性骨材を用いたコンクリート NX, N, B, F を比較すると、膨張率は N>F>B>NX の順で、コア強度は F>B≒NX>N の順であり、N の強度が NX に対して 61.6%（ヤング係数は 54.1%）と明らかに低く、ASR が進行していた。ただし、強度特性の劣る N でもコンクリートの膨張率は 0.064%（鉄筋ひずみの測定結果では 0.050~0.095%）で、小さなひび割れが散見される程度であり、外観からの劣化状況の把握は困難であった。なお、比較用の O の強度特性は NX や B と概ね同程度と考えられる結果であった。

2.2 再生骨材の製造手順

再生骨材の製造は加熱すりもみ法により行った。すりもみには、写真-1 に示す小型のチューブミルを用い、投入口にふるい網を設置し、アンダー分を過粉碎しないように、順次速やかにミル外へ排出するようにした。手順は次のとおりである。

①ハンドブレイカによってコンクリート試験体

表-3 原骨材の ASR 試験結果

記号	迅速法 (JIS A 1804)		化学法 (JIS A 1145)		
	長さ変化率 (%)	判定	Sc (mmol/L)	Rc (mmol/L)	判定
GA	0.236	無害でない	90	50	無害でない
GN	-	-	31	42	無害
SA	0.165	無害でない	117	88	無害でない
SN	-	-	97	116	無害

表-4 解体時のコンクリートの物性

記号	コア強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	膨張率 (%)	
			コンクリートひずみ	鉄筋ひずみ
NX	44.5	25.9	0.009	0.020-0.050
N	27.4	14.0	0.064	0.050-0.095
B	45.8	28.5	0.019	0.025-0.060
F	54.4	27.4	0.041	0.025-0.075
O	41.9	30.5	-	-



写真-1 チューブミル外観

を 100mm 程度以下に粗割し、鉄筋を除去した。
 ②粗割りしたコンクリート塊を 40mm ふるいでふるって、40mm オーバー分はジョークラッシャで 20mm 程度以下となるように破碎した。
 ③ハンドブレイカによる 40mm アンダー分とジョークラッシャによる破碎物を混合した。
 ④空気循環式加熱炉を用いて、③を 300℃で 5 時間加熱した。
 ⑤チューブミルの投入口に 4mm のふるい網をセットし、D19 の鉄筋を媒体（投入原料に対する媒体比 1.0）とし、すりもみ時間を 5, 10, 15, 30, 45 分として、④をすりもんだ。チューブミル内に残った処理品を 25mm のふるいで分級し、通過分を再生粗骨材とした。
 ⑥チューブミルの投入口に 0.25mm のふるい網

をセットして、 $\phi 6\sim 19\text{mm}$ の鉄球を媒体（投入原料に対する媒体比 3.0）とし、すりもみ時間を 30, 60, 90 分として、⑤で分離した 4mm 以下の細粒分（集塵機により浮遊微粉分は除去）をすりもみ、チューブミル内に残った処理品を再生細骨材とした。

2.3 試験方法

試験項目および方法は以下のとおりとした。

(1) 密度・吸水率：再生細・粗骨材について密度・吸水率試験を実施した。

(2) モルタル量：5%塩酸溶液で再生粗骨材のセメント分を溶解し、次のように算定した。

・モルタル量＝（塩酸溶解前の重量－塩酸溶解後の重量）／塩酸溶解前の重量 $\times 100$

※塩酸溶解後の重量：塩酸溶解後に、4mm ふるいでふるった残分

(3) セメントペースト量：5%塩酸溶液で再生細・粗骨材のセメント分を溶解し、次のように算定した。

・セメントペースト量＝（塩酸溶解前の重量－塩酸溶解後の重量）／塩酸溶解前の重量 $\times 100$

※塩酸溶解後の重量：不溶解残分

なお、セメントペーストを溶解して、原骨材を取り出すのに、短いもので 1 週間程度、長いもので 3 週間程度の時間を要した。

(4) 粒度分布：25mm でふるう前の再生粗骨材と再生細骨材についてふるい分け試験を実施し、粗粒率を求めた。

(5) 回収率：初期のコンクリート塊の重量に対する再生粗骨材、再生細骨材の回収率を求めた。

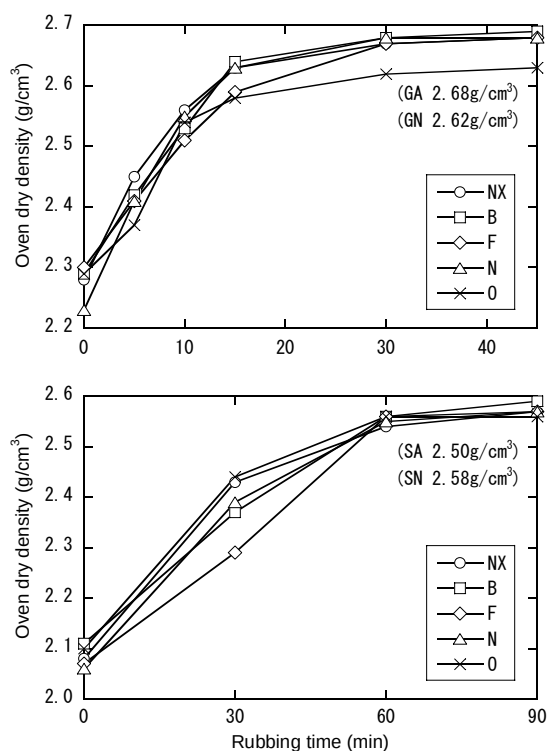
(6) 組成像観察：300℃加熱前後の N と NX のコンクリート片の粗骨材界面について EPMA による組成像観察を行い、組織の粗密さとひび割れについて検討した。組成像観察では、空隙が最も暗く観察される。

3. 実験結果および考察

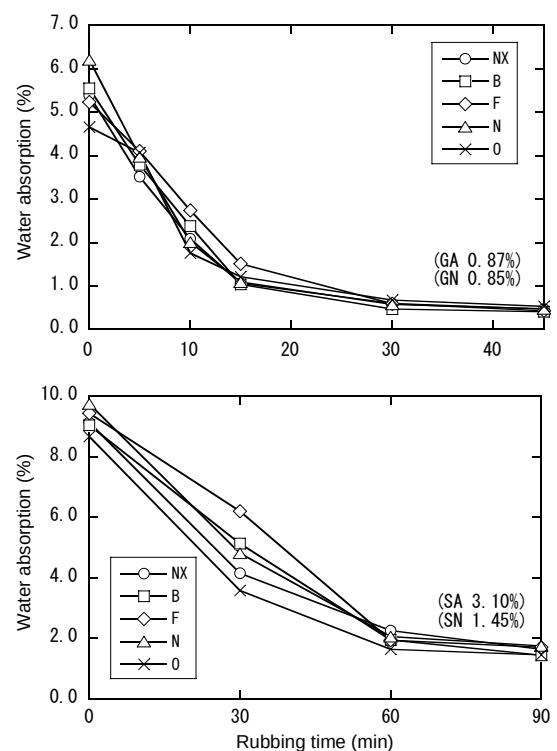
3.1 再生骨材の密度・吸水率

図－1 にすりもみ時間と再生骨材の絶乾密度との関係を、図－2 にすりもみ時間と吸水率との関係を示す。

原コンクリートの種類にかかわらず、再生粗



図－1 すりもみ時間と絶乾密度との関係
(上：再生粗骨材，下：再生細骨材)



図－2 すりもみ時間と吸水率との関係
(上：再生粗骨材，下：再生細骨材)

骨材ではすりもみ時間が 10 分で、再生細骨材ではすりもみ時間が 60 分で絶乾密度が $2.5\text{g}/\text{cm}^3$ 以上の H クラスの高品質再生骨材が得られた。なお、反応性骨材を用いたコンクリートでは、再生粗骨材は 30 分で原粗骨材と概ね同等の品質、再生細骨材は 60 分で原細骨材を上回る品質となった。後者の理由として、密度の高い原粗骨材の破砕物の混入による影響が考えられる。

また、再生粗・細骨材とも F で品質の向上にやや時間を要した。F のコア強度が他よりも高く、骨材とセメントペーストの付着が他のものに比

べて強かったためと考えられる。写真-2 に、F の再生粗骨材を示す。左がすりもみ時間 10 分のもの（絶乾密度 $2.51\text{g}/\text{cm}^3$ ），右がすりもみ時間 30 分（絶乾密度 $2.67\text{g}/\text{cm}^3$ ）のものである。

3.2 再生骨材のモルタル量とペースト量

図-3 にすりもみ時間と再生骨材のモルタル量、セメントペースト量との関係を示す。すりもみ時間が長くなるほど、モルタル量、セメントペースト量とも低下した。再生粗骨材では F を除き 15 分まで、再生細骨材では 60 分までの含有量の低下が比較的大きく、この傾向は再生



写真-2 Fの再生粗骨材の外観
(左：10分すりもみ，右：30分すりもみ)

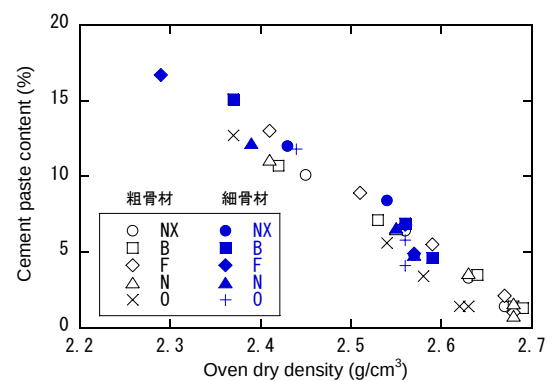


図-4 絶乾密度とペースト量との関係

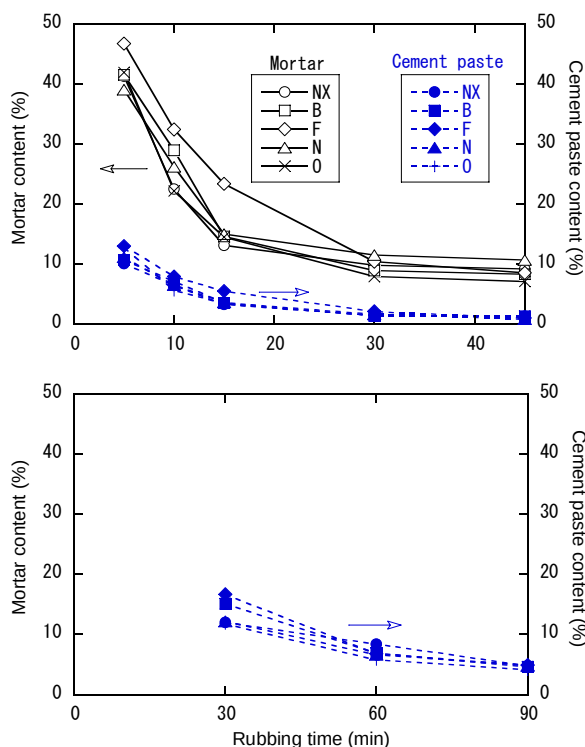


図-3 すりもみ時間とモルタル量・ペースト量との関係（上：再生粗骨材，下：再生細骨材）

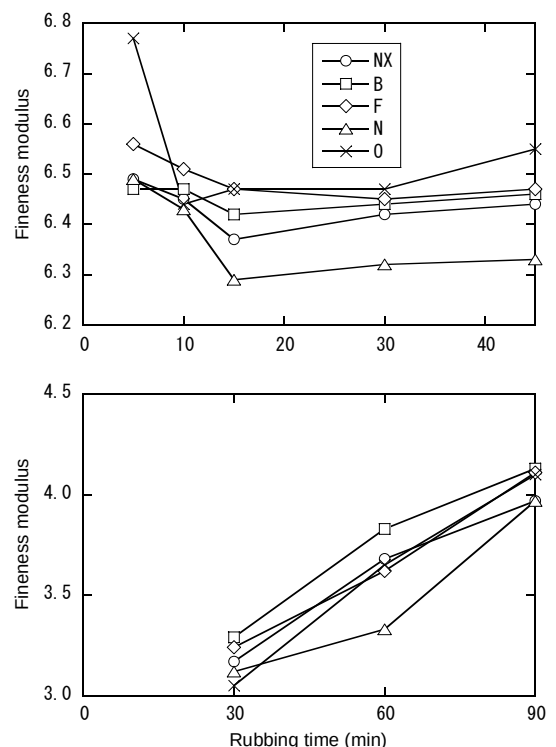


図-5 すりもみ時間と粗粒率との関係（上：再生粗骨材，下：再生細骨材）

骨材の絶乾密度の向上と対応していた。

再生細・粗骨材の絶乾密度とセメントペースト量との関係を図-4に示す。絶乾密度 2.5g/cm^3 の再生粗骨材，再生細骨材に対するセメントペースト量は，いずれも 10%程度と考えられる。なお，塩酸溶解には長期間を要しており，骨材の一部も 5%塩酸に溶解していると考えられることから，実際のセメントペースト量はこれより小さく，結合水を除いたセメント量は，さらにその 7~8 割程度と推定される²⁾。

3.3 再生骨材の粗粒率と回収率

図-5にすりもみ時間と再生骨材の粗粒率との関係を，図-6にすりもみ時間と再生骨材の回収率との関係を示す。

再生粗骨材の粗粒率は全体的に原粗骨材より小さく，これはジョークラッシャでの破碎条件が厳しかったことが原因と考えられる。また，反応性骨材を用いた NX, N, B, F の再生粗骨材の粗粒率が全体的に O より小さいことから，GA は GN より岩質が幾分軟らかいと推察される。なお，N の粗粒率が明らかに小さいが，これは N

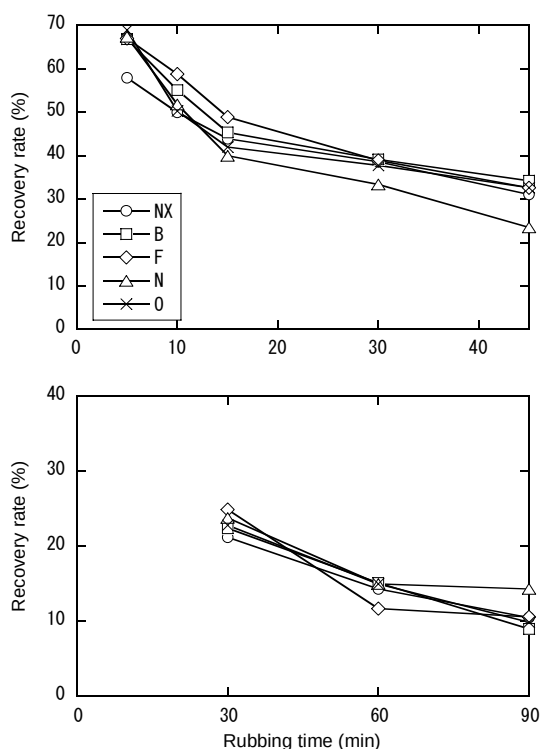


図-6 すりもみ時間と回収率との関係
(上：再生粗骨材，下：再生細骨材)

の粗骨材界面において ASR が進行し，脆弱化した部分が付着セメント分とともに除去され，粒径が小さくなったためと推測される。

また，再生粗骨材の回収率は，すりもみ時間が 15 分以上で，N の回収率は他のものより小さくなっており，劣化した粗骨材界面がすりもみによって除去されているという推測を裏付ける結果であった。

さて，今回の試験で用いた反応性骨材コンクリートは膨張が比較的大きいものでも 0.1%以下であり，目視による ASR の確認は困難であった。しかしながら，劣化を生じたコンクリートでは，アルカリの多い付着セメント分を含め，骨材界面の劣化部は容易に除去できる傾向が認められた。したがって，反応性骨材を用いた場合でも，軽微な劣化であれば，アルカリ総量の規制を満足すれば，再利用しても問題ない可能性は高いと考えられる。

なお，再生細骨材の粗粒率は，原粗骨材の破碎物の混入の影響により全体に大きく，すりもみ時間が長くなるほど，さらに大きくなったが，コンクリートの種類の影響についてはよくわからなかった。回収率も小さくなっていることから，適切な再生細骨材の製造条件について見直しが必要と考えられる。

3.4 再生粗骨材界面の観察

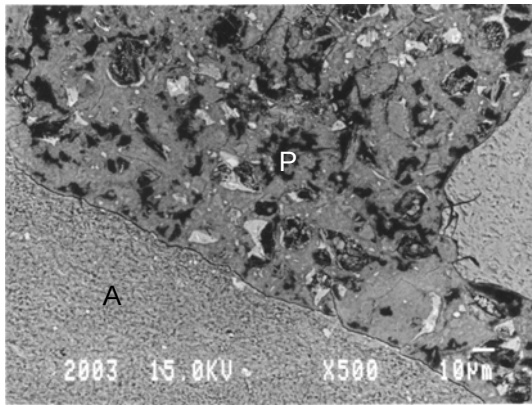
(1) 加熱前

加熱前の粗骨材界面の観察結果を写真-3と写真-4に示す。なお，写真中の記号 A は粗骨材，P はセメントペースト部分を示す。

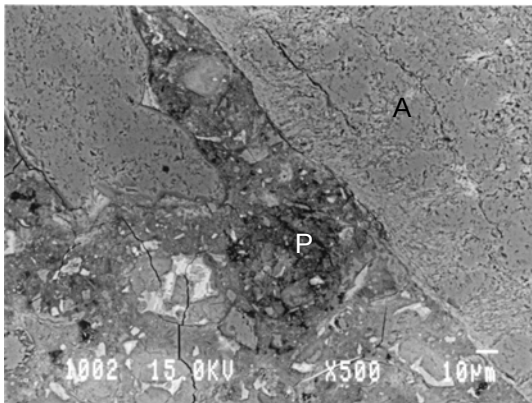
いずれの粗骨材界面にも空隙は見られず，粗骨材とセメントペーストは密着しており，骨材界面および骨材中に ASR によるひび割れのようなものは認められなかった。なお，NX のセメントペーストには暗く観察される部分があり，強度の低い N と比較して粗な組織となっていた。水和物等の組織の違いの影響と考えられるが，詳細な原因は不明である。

(2) 加熱後

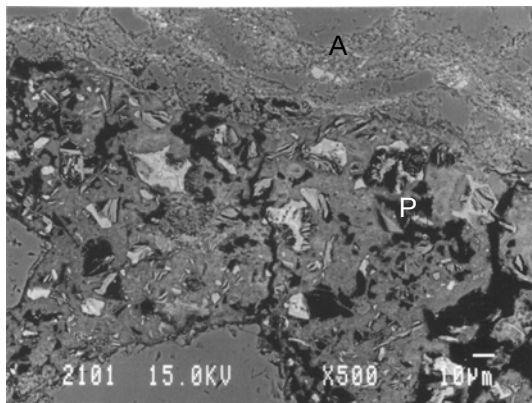
加熱後の結果を写真-5と写真-6に示す。



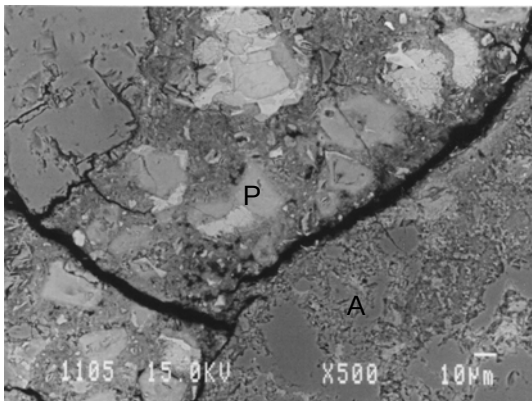
写真－3 加熱前 (NX)



写真－4 加熱前 (N)



写真－5 加熱後 (NX)



写真－6 加熱後 (N)

NX ではわずかに粗骨材界面に空隙は認められる程度であり，セメントペースト部に発生したひび割れ幅は小さかった。一方，N では粗骨材界面とセメントペーストが剥離しており，セメントペースト部分のひび割れも著しかった。

このため，N ではセメントペーストが容易に剥がれ，比較的早い時点から原粗骨材自身のすりもみが進み，粒径が小さくなり，回収率が低下したものと考えられる。

4. まとめ

ASR による劣化状況の異なるコンクリートから得られる再生骨材の品質把握を目的に，加熱すりもみの際のすりもみ時間を変えて，再生骨材の品質や回収率を調べた。主な試験結果は以下のとおりである。

- (1) 反応性骨材を用いたコンクリートの膨張率は，劣化が進行している試験体で 0.064% であり，コア強度はアルカリを添加していないものに対して 61.6% (ヤング係数は 54.1%) であった。
- (2) 今回の試験では，反応性骨材を用いたコンクリートであっても，反応性のない骨材を用いたコンクリートと同様に，絶乾密度 2.5g/cm^3 以上の高品質の再生骨材が得られた。
- (3) 劣化が進行している試験体では，再生粗骨材の粗粒率が他のものよりも小さくなる傾向が認められ，同じ処理時間における回収率も小さかった。原粗骨材界面の劣化部が，すりもみによって除去しやすかったためと考えられる。

参考文献

- 1) 古賀康男ほか：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
- 2) (財) 国土開発技術研究センター：再生コンクリートの利用技術の開発，平成 8 年度報告書，pp.57-60, 1997