

# 論文 加熱すりもみ法によるコンクリート塊からの高品質骨材回収技術の開発

島 裕和<sup>\*1</sup>・鴻巣一巳<sup>\*2</sup>・橋本光一<sup>\*3</sup>・古賀康男<sup>\*4</sup>

**要旨:** コンクリート塊を約 300℃で加熱して、セメントペースト部分を脱水、脆弱化した後、摩砕作用を与え、骨材の周りに付着しているモルタルやセメントペーストを選択的に除去する「加熱すりもみ法」を用い、普通骨材と同等の品質を有する高品質再生骨材を製造する技術の検討を行った。その結果、加熱温度は 300℃程度が適当であることが分かった。また、処理能力 3t/h のパイロットプラントでの骨材回収試験にて、JASS 5 の骨材品質規格を満足する高品質な再生骨材を製造することが出来た。

**キーワード:** コンクリート塊, リサイクル, 加熱, すりもみ, 高品質, 再生骨材

## 1. はじめに

コンクリート塊の発生量は 3,700 万トン（平成 7 年度）であり、その内の 65%がリサイクルされているが、その大部分が路盤材としての再利用である。過去のセメント販売量から、建築構造物と土木構造物の平均寿命をそれぞれ 37 年、50 年とした時の、コンクリート塊の排出量予測を図-1 に示す<sup>1)</sup>。今後、高度成長期に建設されたコンクリート構造物が解体の時期を迎えるため、コンクリート塊の発生量は急増する。現在の路盤材の需要である 2 億トンが今後横這いであると仮定すると、2005 年前後に両者は一致するという結果になった。この予測からも、路盤材以外の再利用の方策が強く求められることになると考えられる。

コンクリート塊からバージン材と同等な品質を有する再生粗骨材と再生細骨材を製造し、レディーミクストコンクリートに再利用し、セメントペーストを主成分とする微粉をセメント原料とすれば、図-2 に示すようなコンクリートのリサイクルが完成する。このようなリサイクルシステムを現実のものとするため、

筆者らは、セメント硬化体が熱に弱い性質があることに着目し、コンクリート塊に熱を加えた後、すりもみ処理を加え、高品質な骨材を回収する加熱すりもみ法について、小規模

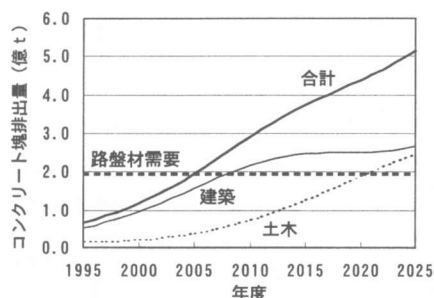


図-1 コンクリート塊の排出量予測

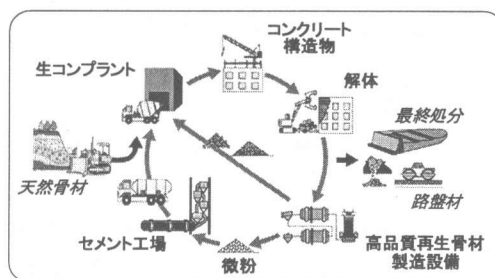


図-2 コンクリートリサイクルの概念図

\*1 三菱マテリアル(株) 環境リサイクル事業センター事業化推進部課長代理 工修 (正会員)

\*2 三菱マテリアル(株) エンジニアリングセンター環境エンジニアリング部課長

\*3 宇部三菱セメント研究所(株) 黒崎センター環境技術グループ主席研究員

\*4 宇部三菱セメント研究所(株) 大宮センターコンクリートグループ主席研究員 (正会員)

設備，連続処理設備，及びパイロットプラントとスケールアップを行いながら検討を行ってきた。本論では，加熱の効果を確認するための小規模設備による骨材回収試験と，パイロットプラントにおける骨材回収試験についての報告を行う。

## 2. 加熱効果に関する実験

コンクリートは 100℃以上の加熱により，セメントペースト中の水和物の脱水が起こり，脆弱化する。一方，コンクリート用の骨材については 500℃程度以上で  $\text{SiO}_2$  の転移等により，品質の劣化が起こるとされている。既報にて，500℃以下の加熱により骨材の劣化がないことを確認している<sup>2)</sup>。

本章では，小規模設備による骨材回収試験を行い，骨材回収に適した加熱温度を把握するため，加熱温度と再生骨材の品質や骨材回収率の関係について調べた。小規模設備による骨材回収のフローを，図-3 に示す。

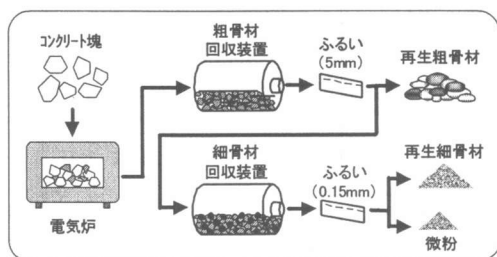


図-3 骨材回収試験フロー

### 2.1 実験概要

#### (1) コンクリート試験体

強度の異なる2つのコンクリート試験体（圧縮強度約 35N/mm<sup>2</sup> 及び 45N/mm<sup>2</sup>）を 40mm 程度以下に破碎して使用した。使用した骨材の種類及び品質を表-1 に示す。

表-1 コンクリート試験体の使用骨材

種類	銘柄・産地	品質
細骨材	木更津産山砂	表乾密度 2.63g/cm <sup>3</sup> ， 吸水率 1.53%
粗骨材	八王子産碎石	Gmax20mm，表乾密度 2.70g/cm <sup>3</sup> ， 吸水率 0.58%

#### (2) 加熱方法

電気炉を用いて，コンクリート試験体を 100～500℃で 3 時間加熱した。

#### (3) 粗骨材回収

所定温度に加熱したコンクリート塊をチューブミル型粗骨材回収装置（φ45×45cm，45rpm）ですりもみ処理した。媒体は異形鉄筋 D13×40cm を 10kg 使用した。1 回の処理量は 10kg とし，処理時間は 15～90 分とした。所定の処理後分級し，5mm ふるいに留まるものを再生粗骨材とした。

#### (4) 細骨材回収

前項で得られた 5mm 通過試料 5kg をチューブミル型細骨材回収装置（φ45×45cm，45rpm）にて 30～90 分間すりもみ処理した。媒体はφ6～19mm の鉄球を 7.5kg 使用した。処理された粉体をふるいで分級し，0.15mm 以上を再生細骨材とした。

#### (5) 評価方法

再生粗・細骨材の絶乾密度，吸水率，及び骨材回収率を測定し，加熱の効果調べた。なお，骨材回収率は骨/コン回収率（再生骨材の絶乾質量/コンクリート塊の絶乾質量×100）を用いて評価した。

### 2.2 粗骨材回収に与える加熱温度の影響

#### (1) 加熱温度が骨材品質に与える影響

コンクリート試験体として 45N/mm<sup>2</sup> 級を用い，粗骨材回収における処理時間を 30 分とし，加熱温度を 100℃から 500℃に変化させたときの再生粗骨材の絶乾密度及び吸水率を図-4 に示した。また，非加熱試料のデータも 20℃加熱として示した。

加熱温度が高いほど品質が向上し，この処理条件の下では 300℃以上の加熱温度で建築工事標準仕様書・解説 JASS 5 の規定値（絶乾密度：2.5g/cm<sup>3</sup> 以上，吸水率 3.0%以下）を満足した。

#### (2) 加熱温度が処理時間に与える影響

各温度における絶乾密度が 2.5g/cm<sup>3</sup> 及び 2.6g/cm<sup>3</sup> になる処理時間を，試験結果の補間

により求め、図-5に示した。

加熱温度が高いほど、処理時間が短くなっており、加熱の効果が確認できた。試験体コンクリートの強度が高いほど、骨材の目標品質が高いほど、処理時間が長くなると同時に、加熱による処理時間の減少が顕著であった。しかし、処理時間の減少は300℃以上で鈍化した。

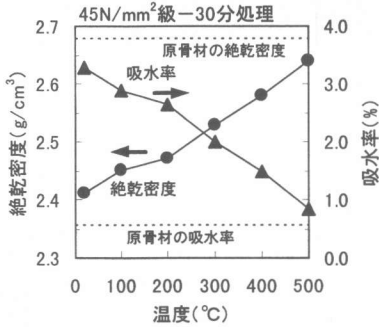


図-4 加熱温度と再生粗骨材の品質

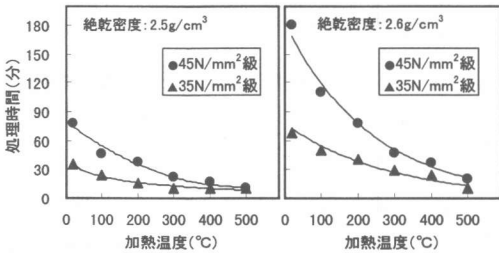


図-5 加熱温度と処理時間

### 2.3 細骨材回収に与える加熱温度の影響

粗骨材回収において、再生粗骨材の絶対乾密度が2.55g/cm<sup>3</sup>程度となる運転条件を設定し、そのとき得られた5mm通過試料を原料とした。その試料を細骨材回収装置ですりもみ処理し、再生細骨材の品質や骨材回収率を調べた。

なお、試験要因は加熱温度を3条件（非加熱、100℃、300℃）とした。

#### (1) 加熱温度が骨材品質に与える影響

45N/mm<sup>2</sup>級、処理時間60分のときの、加熱温度と品質の関係を図-6に示した。加熱温度が300℃でJASS5の規定値（絶対乾密度：2.5g/cm<sup>3</sup>以上、吸水率3.5%以下）を満足した。

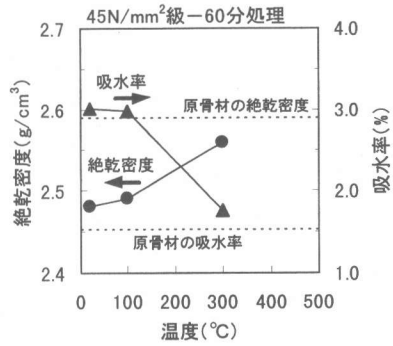


図-6 加熱温度と再生細骨材の品質

#### (2) 加熱温度が処理時間に与える影響

各温度で、絶対乾密度が2.50g/cm<sup>3</sup>及び2.55g/cm<sup>3</sup>になる処理時間を試験結果の補間により求め、図-7に示した。

300℃で処理時間が短くなっており、加熱の効果が確認できた。骨材の目標品質が高いほど、処理時間が長くなったが、粗骨材と異なり、コンクリート試験体強度が処理時間に与える影響はほとんど見られなかった。

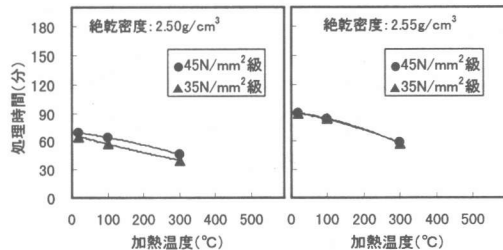


図-7 加熱温度と処理時間

### 2.4 加熱温度が骨材回収率に与える影響

再生粗・細骨材の絶対乾密度をそれぞれ2.55g/cm<sup>3</sup>、2.52g/cm<sup>3</sup>程度とするときの、骨/コン回収率を図-8に示す。温度の増加と共に、粗骨材の骨/コン回収率は若干増加し、細骨材のそれは減少している。しかし、合計の回収率はほぼ横這いであった。

### 2.5 加熱温度の設定

本章では、加熱温度が再生骨材の品質や骨材回収率に与える影響について検討を行った。

その結果、強度の高いコンクリートの処理

や、高品質な再生骨材を得る場合を想定すれば、加熱温度は 300℃以上、骨材の劣化を考慮すれば 500℃以下が適正な範囲と考えられる。再生骨材の品質やすりもみ時間の面では、加熱温度が高い方が望ましいが、経済性の面からは、すりもみ時間の延長に比べ、加熱温度の上昇はコスト高につながると予想されるため、標準的な加熱温度は 300℃と設定した。

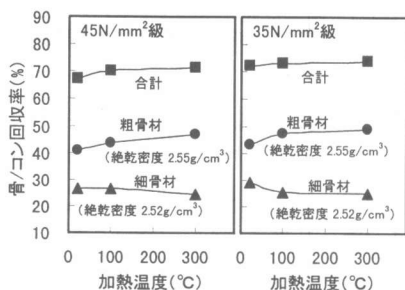


図-8 加熱温度が骨材回収率に与える影響

### 3. パイロットプラントを用いた骨材回収試験

小規模設備及び連続処理設備（処理量 300kg/h）での種々の骨材回収試験にて、JASS 5 の骨材品質規格を満足する再生骨材が骨／コン回収率 70%以上で回収できることを確認した<sup>3,4)</sup>。その結果を踏まえ、処理能力 3t/h のパイロットプラントを設計、製作し、JASS 5 の骨材品質規格を満足する再生骨材を回収することを目的に骨材回収試験を行った。

#### (1) 設備概要

本パイロットプラントは、移設可能であることを特長としている。主要設備が約 20 個のユニットフレームに据え付けられており、これらを分割することでトレーラーによる移設が可能である。パイロットプラントの全景を写真-1 に示す。また、プロセスフローを図-9 に示す。

はじめに、充填型加熱設備の上部より連続的に投入されるコンクリート塊と、下部から吹き込んだ熱風を熱交換させることで、コンクリート塊を均一に約 300℃に加熱する。

粗骨材回収設備は、チューブミル型とアト

ライター型の 2 つがあり、それぞれを単独で用いて試験を行った。

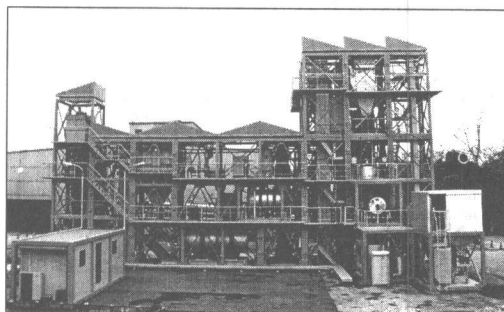


写真-1 パイロットプラントの全景

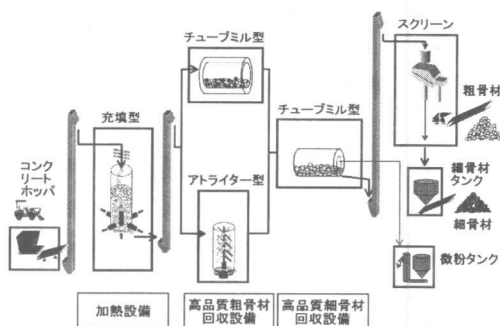


図-9 パイロットプラントのプロセスフロー

チューブミル型は、鉄球を媒体とする横型回転式で、連続的に加熱コンクリート塊をすりもみ処理する。外周に設置された約 4mm のメッシュから、モルタル分及び微粉分を排出することで、すりもみの効果を上げた。

アトライター型は、回転するピンを中央に据えた塔内に、連続的にコンクリート塊を充填し、ピン及びコンクリート塊同士の接触にてすりもみ処理がなされる。

細骨材回収設備は、チューブミル型で、設備の大型化に伴い顕在化した媒体による細骨材の粉碎を抑えるため、鉄球より比重の小さい粗骨材を媒体とした。つまり、粗骨材回収設備から排出された粗骨材及びモルタル分（微粉分を含む）を共に細骨材回収設備に投入することで、粗骨材が媒体の役割をし、モルタル分がすりもまれ、再生細骨材が回収される。微粉分はミル内通風により除去される。

細骨材回収装置から排出された粗骨材と細骨材は5mmふるいにより分級され製品となる。

### 3.1 試験概要

#### (1) コンクリート試験体

コンクリート試験体は、レディーミクストコンクリート工場で混練したものを15×10×0.6mの平板状に打設し、材齢約100日経過後粗破碎し、ジョークラッシャーで50mmアンダーに破碎したものを使用した。コンクリート試験体の使用材料、調合、圧縮強度試験結果をそれぞれ、表-2、3、4に示す。

表-2 コンクリート試験体の使用材料

種類	銘柄・産地	品質
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
化学混和剤	AE減水剤	
細骨材	静岡産川砂	表乾密度 2.64g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.65%, 粗粒率 2.84
粗骨材	静岡産砂利	Gmax25mm, 表乾密度 2.65g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.96%, 実積率 65.4%

表-3 コンクリート試験体の調合

W/C (%)	s/a (%)	スラブ (cm)	空気量 (%)	単位置 (kg/m <sup>3</sup> )			
				C	W	S	G
57	42	18	4.5	307	175	758	1049

表-4 コンクリート試験体の圧縮強度

種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
	材齢 28 日	材齢 115 日 <sup>*</sup>
テストピース (標準養生)	28.8	-
コアサンプル	-	33.6

\*骨材回収に合わせてコア強度を測定

#### (2) 試験方法

コンクリート試験体のフィード量を3t/h、加熱温度を300℃とし、表-5に示す条件で粗骨材回収、細骨材回収を行ない、得られた再生粗・細骨材の品質及び回収率を測定した。すりもみ条件が骨材回収に与える影響を調べるために、パラメーターとして、チューブミルの回転数やアトライターのピン周速を変化させた。

### 3.2 試験結果

#### (1) 骨材品質及び骨材回収率

各条件で骨材回収を行ったときの骨材品質と骨/コン回収率、骨/骨回収率（再生骨材の絶

乾質量/原コンクリート中に含まれる骨材の絶乾質量×100）を表-6に示す。

粗骨材回収にチューブミル型とアトライター型のいずれを用いた場合も、JASS 5品質の絶乾密度、吸水率を満足することが出来た。チューブミル型を用いたときの全体の骨材回収率は、骨/コン回収率で69%、骨/骨回収率で83%であった。また、アトライター型を用いた場合はそれぞれ、57~63%、68~76%で、チューブミル型による回収率より劣った。これは細骨材の回収率が低いためであり、アトライターで細骨材の粉砕が起きていることが理由として考えられた。

表-5 骨材回収試験条件

	粗骨材回収装置		細骨材回収装置	
	種類	運転条件	種類	運転条件
チ60-60	チューブミル	回転数 (臨界速度比 <sup>*</sup> ) 60%	チューブミル	回転数 (臨界速度比 <sup>*</sup> ) 60%
チ70-70		" 70%		" 70%
チ80-80		" 80%		" 80%
ア1.5-80	アトライター	ピン周速 1.5m/s	アトライター	" 80%
ア3-80		" 3m/s		" 80%
ア5-80		" 5m/s		" 80%

\* 臨界速度：遠心力によりミルの内容物が落ちなくなるときのミル回転速度

#### (2) 再生粗・細骨材の絶乾密度と吸水率

再生粗・細骨材の絶乾密度と吸水率の関係を図-10に示す。粗骨材、細骨材とも両者の間には直線関係があった。図から再生粗・細骨材の絶乾密度と吸水率がJASS 5の骨材品質規格を満足するためには、絶乾密度が2.5g/cm<sup>3</sup>を満足すればよいことが分かった。

#### (3) すりもみ条件が骨材品質に与える影響

チューブミル型粗・細骨材回収装置にて回収を行ったときの、回転数が絶乾密度に与える影響を図-11に示す。

粗・細骨材回収装置の回転数が増加するに従い、それぞれ粗・細骨材の品質が上昇しており、回転数により再生骨材の品質を変化させることが出来ることが分かった。

一方、粗骨材回収にアトライター型を用いた場合は、ピン周速が1.5m/sから3m/sに増加し

表-6 再生骨材品質と回収率

回収条件	粗骨材回収				細骨材回収				全体	
	粗骨材品質		骨/コン回収率 (%)	骨/骨回収率 <sup>a</sup> (%)	細骨材品質		骨/コン回収率 (%)	骨/骨回収率 <sup>a</sup> (%)	骨/コン回収率 (%)	骨/骨回収率 <sup>a</sup> (%)
	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)			絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)				
チ60-60	2.43	3.32	51.8	108	2.33	5.44	24.6	71	76.4	93
チ70-70	2.54	1.75	42.2	88	2.47	3.26	33.1	96	75.3	91
チ80-80	2.58	1.29	42.0	88	2.55	1.95	26.5	77	68.5	83
ア1.5-80	2.51	2.22	42.7	89	2.50	2.77	19.8	57	62.5	76
ア3-80	2.55	1.82	41.2	86	2.55	1.96	16.4	47	57.6	70
ア5-80	2.55	1.66	42.9	90	2.55	2.15	13.6	39	56.5	68

網掛けは JASS 5 を満足したことを示す。\*コンクリートの絶乾単位容積質量を 1.25C+S+G にて計算した。

たときには、粗骨材の品質が向上したが、それ以上では変化がなく、さらなる運転条件の検討が必要と考えられた。

での差は大きくなかった。加熱温度は 300℃程度が適切と考えられる。

(2)処理能力 3t/h のパイロットプラントにおける骨材回収試験にて、JASS 5 の骨材品質規格の絶乾密度、吸水率を満足する再生骨材が、60～70%程度の骨/コン回収率で回収することができた。

なお、本研究の一部は新エネルギー・産業技術総合開発機構、廃コンクリート等建材リサイクル技術の開発の成果である。

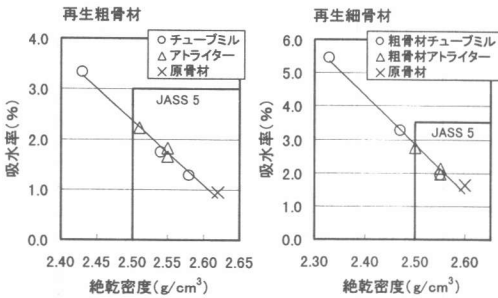


図-1 10 再生粗・細骨材の絶乾密度と吸水率の関係

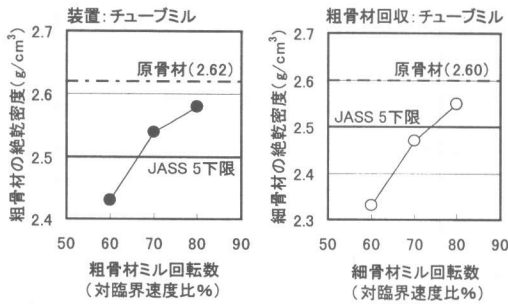


図-1 11 回収装置回転数が絶乾密度に与える影響

#### 4. まとめ

加熱すりもみ法を用いた骨材回収試験を行った結果、以下の知見を得た。

(1)加熱温度が 100～500℃の範囲では、温度が高いほど、所定の再生骨材品質を得るために必要なすりもみ処理の時間が短い、300℃以上

#### 参考文献

- 1)財団法人 原子力発電技術機構：軽水炉等改良技術確証試験 実用発電用原子炉廃炉設備確証試験に関する調査報告書(2/6) 平成 10 年度, pp.104-120, 1999
- 2)古賀康男他：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, Vol.3, No.2, pp.17-25, 1997
- 3)立屋敷久志他, 解体コンクリートからの高品質骨材回収技術, 建設用原材料, Vol.9, No.1, pp.21-25, 1999
- 4)中戸毅之他, 高品質再生骨材の製造技術に関する開発 [Ⅲ], 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.123-124, 1999