

# 論文 遊星ミルによる再生細骨材製造技術に関する研究

池尾 陽作\*1・米澤 敏男\*2・蓮見 孝志\*1・釜野 博臣\*3

**要旨：**高品質な再生細骨材の製造を目的として、遊星ミルの適用の可能性について検討を行った。バッチ式遊星ミルを用いた実験の結果、ミルポット内の微粒子が再生細骨材の品質に大きな影響を及ぼしており、微粒子の除去が有効であることを確認した。連続処理とミルポット内の微粒子の除去が可能な連続式遊星ミル型の処理装置を試作して、解体コンクリート細粒の処理条件が再生細骨材の品質に及ぼす影響を調べた結果、遠心加速度、処理速度の影響が大きく、それらの条件を調整することで遊星ミルでの再生細骨材の製造が可能であることを確認した。

**キーワード：**再生骨材、細骨材、遊星ミル、絶乾密度、吸水率、すりもみ処理

## 1. はじめに

コンクリート廃材量は2005年度で約3300万tであり、建設副産物の多くを占めている。その用途の多くは、埋め戻し材料や路盤材料であるが、新設の道路工事の減少や路盤材には高炉スラグ等の他産業からの廃棄物も利用されており、その需要は低下しつつある。そのため、コンクリート廃材の有効利用を図るために、解体コンクリートから骨材を回収してコンクリート用骨材として利用する技術の研究が行われてきた。再生骨材のJISも制定されて、コンクリートのリサイクル技術として実用化されつつある。

筆者らは、再生粗骨材の製造技術の研究を行い、普通粗骨材とほぼ同等の品質の再生粗骨材が製造可能であり、その再生粗骨材を用いた再生コンクリートが普通骨材コンクリートとほぼ同等の品質を有することを示してきた<sup>1)2)</sup>。しかし、解体コンクリートからの再生粗骨材の回収率は約30%であり、コンクリートリサイクルをより進めるためには、粗骨材を取り除いた後に残った細粒（以降、解体コンクリート細粒と呼ぶ）から細骨材を回収するための技術が必要であり、各種の研究が行われている<sup>3)</sup>。本報では、高品質な再生細骨材の製造を目的として、遊星ミル型の処理装置を試作して再生細骨材の製造を試み、解体コンクリート細粒の処理条件が再生細骨材の品質に及ぼす影響を検討した。

## 2. バッチ式遊星ミルによる原理実験

### 2.1 遊星ミル

遊星ミルは、図-1に示すようにポットの自転と公転により大きな遠心加速度を発生し、原料を粉砕する装置である。再生細骨材の品質を高めるためには、細骨材を

極力粉砕せずに細骨材表面に付着したセメント硬化体を取り除く必要がある。そこで、解体コンクリート細粒同士を遊星ミルが発生する大きな遠心力ですりもみ処理することで、表面に付着したセメント硬化体を取り除くことができると考え、本研究では遊星ミルを採用した。写真-1に実験で用いたバッチ式の遊星ミルとポットを示す。ポットは、φ100mm×300mmのものを用いた。

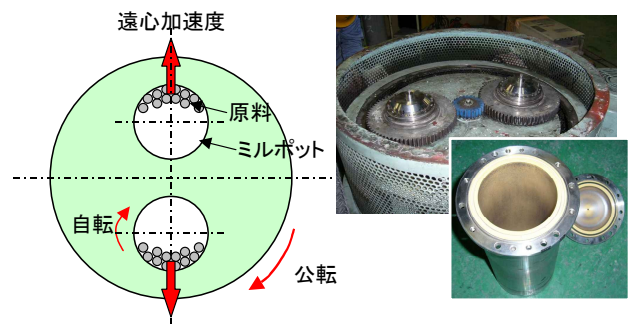


図-1 遊星ミルの概要 写真-1 バッチ式遊星ミルとミルポット

### 2.2 実験の因子と水準

バッチ式遊星ミルを用いて解体コンクリート細粒の処理に関する検討を行った。実験の因子と水準を表-1に示す。処理時間、処理回数、媒体の種類を因子とした。

表-1 実験の因子と水準

因子	水準
処理時間	1.5分, 3分, 5分
処理回数	1回処理, 2回処理, 3回処理, 4回処理
媒体種類	なし, 碎石(10~20mm), 鉄球(φ10mm)

\*1 (株)竹中工務店 技術研究所 先端技術研究部 (正会員)

\*2 (株)竹中工務店 技術研究所 Ph.D. (正会員)

\*3 (株)栗本鐵工所 技術開発本部 プロセス技術開発部

## 2.3 実験方法

### (1) 材料

処理原料として、解体現場で発生した解体コンクリートから偏心ロータ式高品質再生粗骨材製造装置を用いて粗骨材を回収し、その後に発生した解体コンクリート細粒を使用した。

### (2) 処理方法

写真-1の装置を用いて、公転回転数 686rpm, 自転回転数 245rpm とし、遠心加速度 130G の条件で処理を行った。媒体を用いた場合の媒体/処理原料の体積比率は 50% とした。また、図-2 に示すフローで処理を行い、複数回の処理を行う場合は、1 回目の処理は 1.5 分とし、2 回目以降はふるいにかけて採取した 0.6mm 以上の粒子のみを処理原料とした。

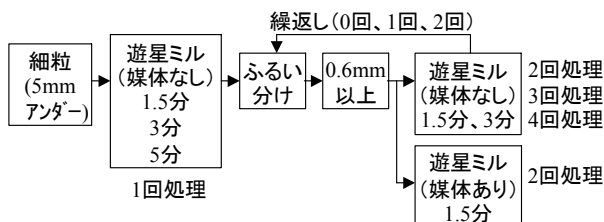


図-2 処理フロー

### (3) 評価方法

処理後の試料について JIS A 1102 に従って粒度試験を行った。また、0.6mm 以上の粒子について JIS A 1109 に従って密度・吸水率を測定した。密度・吸水率測定用の 0.6mm 以上の試料採取の際、粒子表面についた微粒子は水洗して除去した。

## 2.4 実験結果

### (1) 粒度分布

処理回数 1 回、媒体なしの場合の粒度分布を図-3 に示す。処理前に比べ小径側の粒子が多少増加した。処理時間による差はほとんど認められなかった。

処理時間と 0.6mm 以上の粒子の回収率 (0.6mm 残留物/処理回収物) を図-4 に示す。処理時間による大きな差はなく、処理時間を長くしてもすりもみ作用の進行はほとんど確認できなかった。処理回数と 0.6mm 以上の粒子の回収率を図-5 に示す。処理を繰り返した場合は、媒体の有無にかかわらず 0.6mm 以上の粒子回収率は低下する傾向を示した。媒体を用いた場合は回収率が大きく低下する傾向を示し、特に鉄球を用いた場合に回収率が低下した。これらの結果から、遊星ミルを用いた場合は、媒体を用いなくても細粒同士のすりもみにより粉砕が進行すること、媒体を用いた場合には非常に早く粉砕が進行することが確認された。また、処理時間を長くしても粉砕がほとんど進行せず、0.6mm 以下の微粒子を除去して繰返し処理した場合に粉砕の進行が認められた

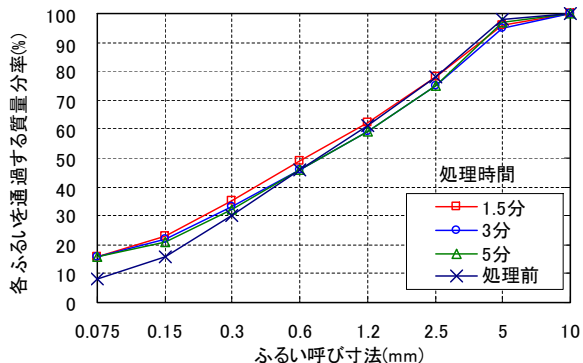


図-3 処理時間と粒度分布の関係 (1回処理, 媒体なし)

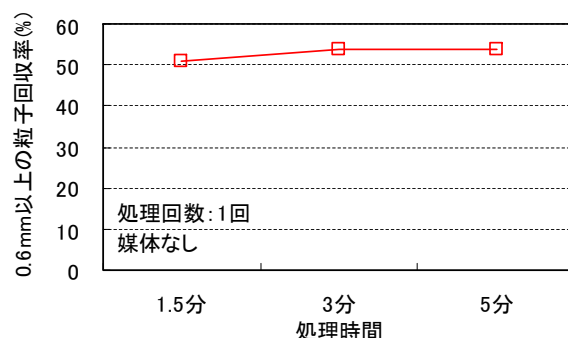


図-4 処理時間と 0.6mm 以上の粒子回収率の関係

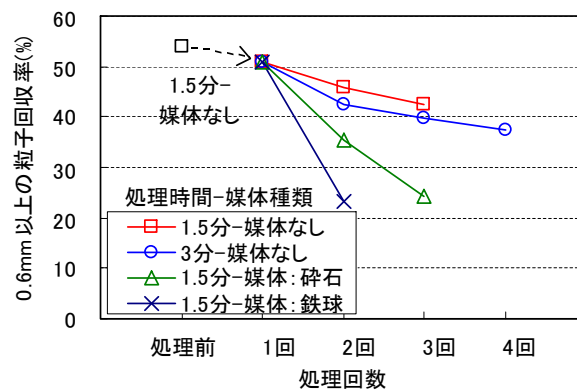


図-5 処理回数と 0.6mm 以上の粒子回収率の関係

ことから、微粒子の存在がすりもみ作用の妨げになっていることが考えられる。ミルポット内に微粒子が多く存在した場合には、微粒子が緩衝材として働くことや微粒子が再付着するため、すりもみによる粉砕が進行しないと推測される。

### (2) 密度・吸水率

処理時間と絶対乾密度、吸水率の関係を図-6 に示す。処理時間を変化させても絶対乾密度、吸水率にほとんど差は認められなかった。処理回数と絶対乾密度の関係を図-7 に示す。処理を繰り返した場合に絶対乾密度が増加する傾向が認められた。媒体を用いた場合は、媒体なし

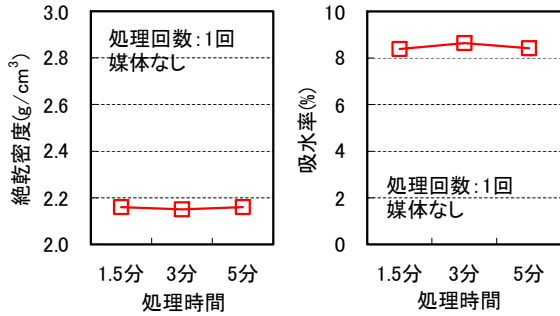


図-6 処理時間と絶対乾密度，吸水率の関係

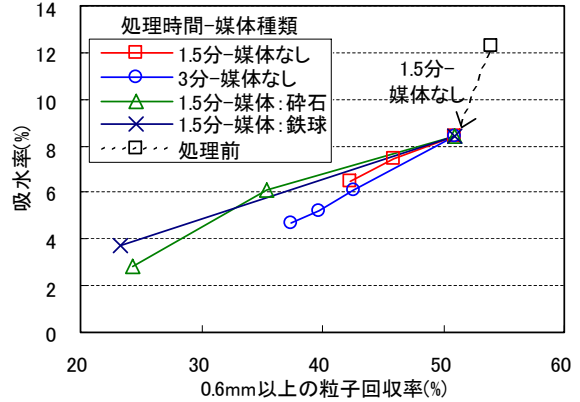


図-10 回収率と吸水率の関係

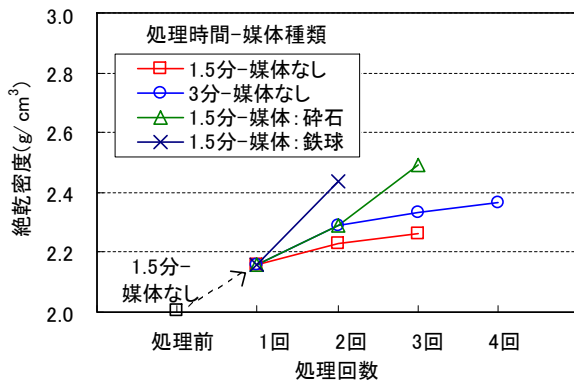


図-7 処理回数と絶対乾密度の関係

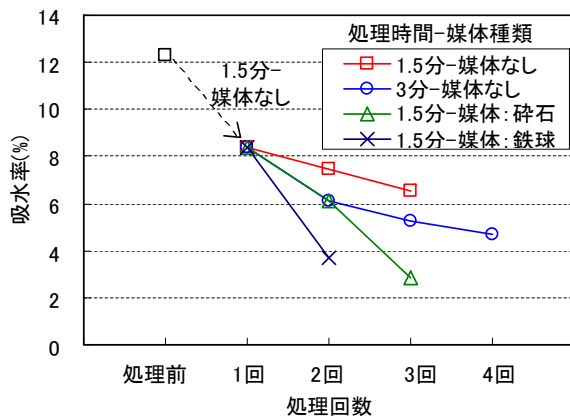


図-8 処理回数と吸水率の関係

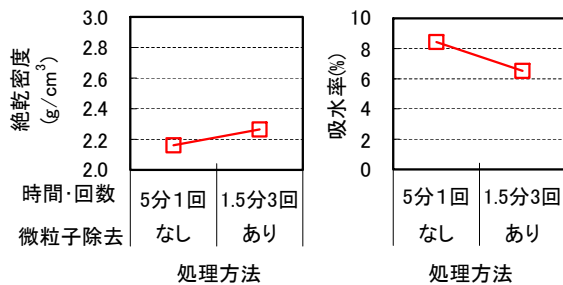


図-9 微粒子除去と絶対乾密度，吸水率の関係

に比べて同じ処理回数でも絶対乾密度が高くなった。処理回数と吸水率の関係を図-8 に示す。処理を繰り返すことで吸水率が低下する傾向が認められた。媒体なしの場合は、処理時間が長い方がやや吸水率が低くなった。媒体を用いた場合は、媒体なしに比べて同じ処理回数でも吸水率が低くなる傾向を示した。碎石を用いた3回処理の吸水率が特に低くなった原因として、吸水率測定試料に媒体に用いた碎石が混入した可能性が考えられる。

微粒子除去と絶対乾密度，吸水率の関係を図-9 に示す。処理時間の合計がほぼ同じ5分1回処理と1.5分3回処理において、微粒子除去を行った1.5分3回処理の方が再生細骨材の品質が向上した。遊星ミルでの再生細骨材製造ではミルポット内の微粒子の除去が有効であると考えられる。

0.6mm以上の粒子の回収率と吸水率の関係を図-10 に示す。回収率が低下するほど吸水率が低くなる傾向が認められた。粉砕が進行するほど細骨材表面のセメント硬化体が除去されているためと考えられる。媒体を用いた場合は、粉砕が急激に進行するため回収率が非常に低くなった。媒体なしの方が媒体を用いた場合に比べ吸水率が低く回収率が高い傾向を示した。媒体を用いない場合は、粒子同士のすりもみだけで表面のセメント硬化体が除去され、細骨材の粉砕を抑制できているためと考えられる。

### 3. 連続式遊星ミルによる実験

#### 3.1 連続式遊星ミル

バッチ式遊星ミルでの実験の結果、遊星ミルの原理で再生細骨材製造が可能であることがわかった。そこで、連続的に処理が可能な連続式遊星ミル型の再生細骨材製造装置を試作した。装置の外観を写真-2 に、概要を図-11 に示す。装置の諸元は、下記のとおりである。

- ・公転直径：500mm ・ミルポット寸法：φ100×388mm
- ・最大回転数：公転 756rpm，自転 471rpm
- ・最大加速度：200G



写真-2 装置の外観

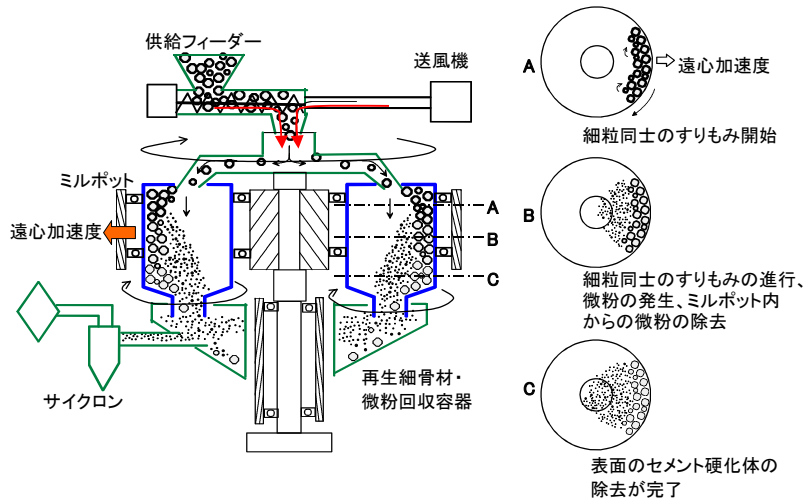


図-11 装置の概要

自転公転する遊星ミルに投入された解体コンクリート細粒は、ミルポット内で細粒同士のすりもみにより徐々に表面のセメント硬化体が除去され、排出される。遊星ミルの処理では、ミルポット内の微粒子が処理能力に大きな影響を及ぼすことから、処理中に送風機でミルポット内へ通風して微粒子を除去できるようにした。自転と公転の回転方向に関しては、同一方向の場合は粒子同士が同方向に回転してすりもみ作用が大きくなり表面のやわらかいセメント硬化体部分が選択的に粉砕されるが、逆方向の場合は粒子同士の衝突が激しくなり硬い細骨材部分も粉砕される。そのため同一方向とした。試作した装置では加速度（回転数）、処理速度、送風速度を変化させることが可能である。

### 3.2 実験の因子と水準

実験の因子と水準を表-2 に示す。遠心加速度はミルポットの自転数と公転数により調整した。処理速度は供給フィーダーの回転数の調整により設定した。

表-2 実験の因子と水準

因子	水準
遠心加速度	80G, 115G, 150G
設定処理速度	5kg/h, 10kg/h, 15kg/h
送風速度	0.42m/s, 0.21m/s
細粒種類	A, B

### 3.3 実験方法

#### (1) 材料

解体現場で発生した解体コンクリートから偏心ロータ式高品質再生粗骨材製造装置を用いて粗骨材を回収し、その後発生した解体コンクリート細粒を使用した。解体コンクリート細粒の品質を表-3 に示す。

表-3 解体コンクリート細粒の品質

細粒種類	全体		0.6mm 以上	
	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)
A	2.08	10.42	2.16	8.78
B	1.89	16.00	1.99	12.92

#### (2) 処理方法

写真-2 の装置を用いて各条件で処理を行った。媒体は用いなかった。回収容器の容量の関係で1回の実験における連続処理量を最大5kgとした。供給フィーダーの回転数の調整により処理速度を約5kg/h、約10kg/h、約15kg/hに設定した。ただし、正確な処理速度は処理後に処理時間と処理量から算出した。

#### (3) 評価方法

処理後の試料について JIS A 1102 に従って粒度試験を行った。また、0.6mm以上の粒子について JIS A 1109 に従って密度・吸水率を測定した。密度・吸水率測定用の0.6mm以上の試料採取の際、粒子表面についての微粉分は水洗して除去した。

### 3.4 実験結果

#### (1) 粒度分布

設定処理速度5kg/h、送風速度0.42m/sで細粒Aを処理した場合の加速度と粒度分布の関係を図-12に示す。処理後は全体的に小径側に分布が移行した。また、加速度が大きいかほど細かい粒子が増加する傾向がみられた。微粒子を除去しない場合のバッチ式遊星ミルでの処理結果(図-3)に比べて全体的に小径側に分布が大きく移行しており、本装置ではすりもみ作用がより進行していることが確認された。

細粒Aについて加速度と0.6mm以上の粒子回収率の関係を図-13に示す。加速度が大きいかほど、処理速度が遅いかほど回収率が低下する傾向を示した。ミルポット内



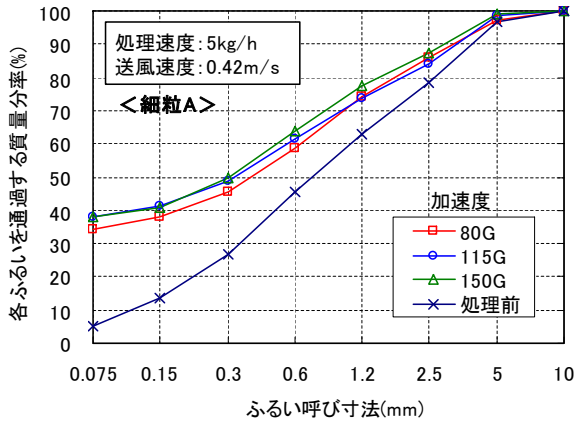


図-12 加速度と粒度分布の関係

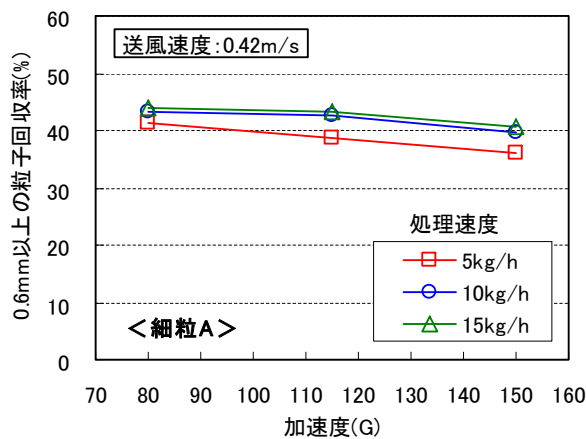


図-13 加速度と0.6mm以上の粒子回収率の関係

での細粒の滞留時間が長いほどすりもみ作用が進行するためと考えられる。また、今回の実験条件では、回収率は30~50%の範囲であった。バッチ式の実験結果(図-5)の媒体を用いない場合とほぼ同じ範囲に収まっており、媒体を用いないことが細骨材の粉碎を抑制したと考えられる。

(2) 密度・吸水率

加速度と絶対乾密度の関係を図-14に示す。細粒A、細粒Bとも処理速度5kg/hの場合、加速度が大きいほど再生細骨材の密度が高くなる傾向を示した。細粒Aの処理速度10kg/h、15kg/hでは、加速度が変化しても密度に大きな差は認められなかった。また、細粒A、Bとも、処理速度が遅いほど密度は高くなる傾向を示し、細粒Aから得られた再生細骨材においては、設定処理速度が5kg/hで加速度が115Gより大きい場合に再生細骨材H(JIS A 5021)の規格値を満足した。細粒Bを原料とした場合は細粒Aを原料とした場合に比べて同じ処理条件での密度が低くなった。原料の細粒Bの密度が細粒Aに比べて低いことが処理後の品質に関係していると考えられる。

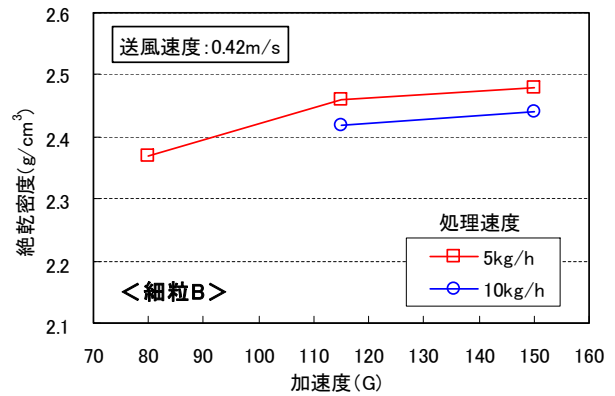
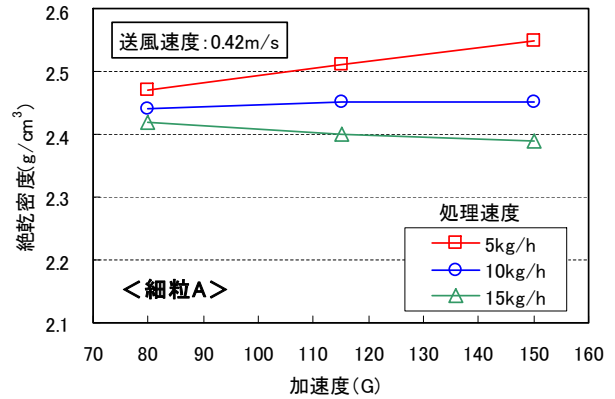


図-14 加速度と絶対乾密度の関係

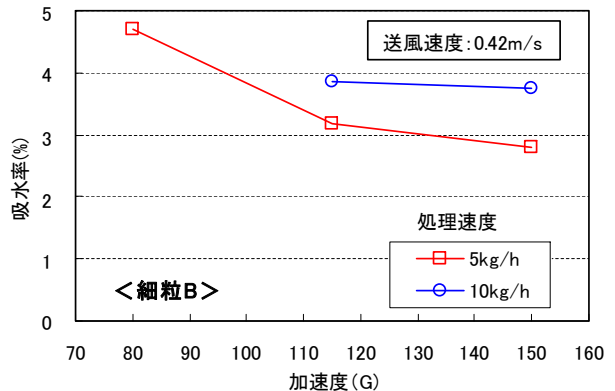
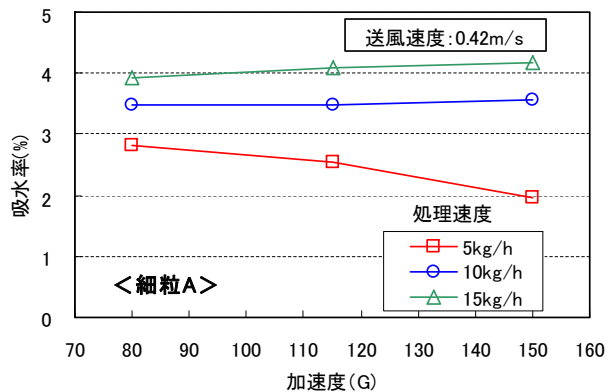


図-15 加速度と吸水率の関係



処理前（細粒 A）

処理後

（条件：加速度 115G、処理速度 5kg/h、送風速度 0.42m/s）

写真-3 再生細骨材

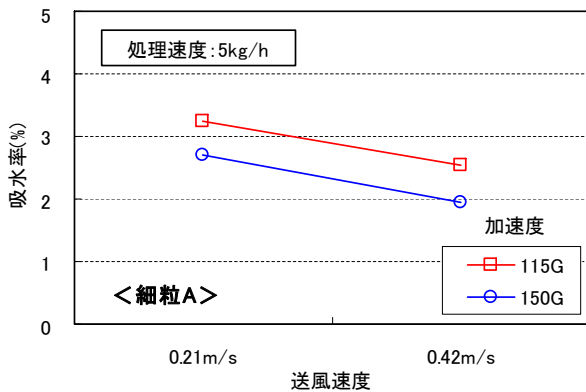


図-16 送風速度と吸水率の関係

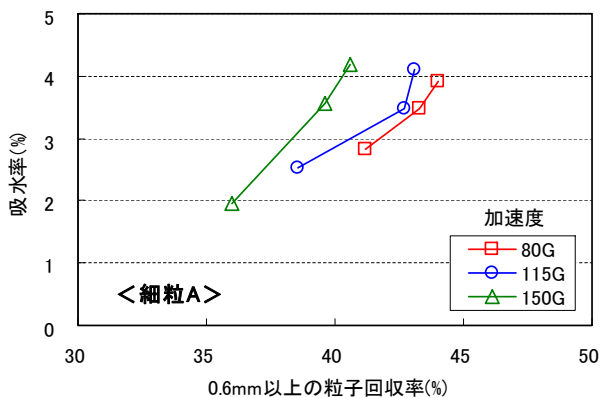


図-17 回収率と吸水率の関係

加速度と吸水率の関係を図-15 に示す。処理速度 5kg/h の場合は加速度が大きいほど吸水率が低下する傾向を示したが、処理速度が速い場合は加速度と吸水率に明確な関係は認められなかった。また、処理速度が遅いほど吸水率は低くなる傾向を示し、細粒 A においては、処理速度が 5kg/h の場合に再生細骨材 H の規格値を満足した。細粒 B を原料とした場合は、細粒 A を原料とした場合に比べて吸水率が高くなる傾向を示した。

処理後の再生細骨材を写真-3 に示す。細粒表面のセメント硬化体が除去されているのが確認できる。

送風速度と吸水率の関係を図-16 に示す。送風速度が速いほど吸水率が低くなった。送風速度が速い場合は、すりもみ作用の妨げとなるミルポット内の微粒子が気流とともに除去され、処理が促進されたと考えられる。

0.6mm 以上の粒子の回収率と吸水率の関係を図-17 に示す。全体的に回収率が高くなるほど吸水率が高くなる傾向が認められた。なお、同程度の吸水率の場合に加速度が大きいほど回収率が低くなった原因として、原料サンプルのばらつきのほか、加速度が大きい場合はすりもみ効果が高いため、セメント硬化体の付着が少ない細粒では骨材自体が部分的にすりもみされた可能性も考えられる。

#### 4. まとめ

本研究の結果をまとめると以下のとおりである。

- (1)遊星ミルでの再生細骨材の製造は可能であり、解体コンクリート細粒の処理条件により再生細骨材 H の規格値を満足する再生細骨材が得られることが確認できた。
- (2)遊星ミルでは、ミルポット内の微粒子の存在が解体コンクリート細粒の処理に大きく影響を及ぼしており、微粒子を除去することで処理が促進された。
- (3)遊星ミルでは、媒体を用いずに解体コンクリート細粒を処理することで、細骨材の粉砕を抑制しながら再生細骨材の製造が可能である。
- (4)今回の試験範囲においては、処理速度が遅いほど、処理速度が遅い場合は加速度が大きいほど再生細骨材の品質が向上した。
- (5)処理原料の絶乾密度、吸水率が処理後の再生細骨材の品質に対応しており、原料により処理条件を設定することが必要である。

#### 謝辞

本研究は NEDO の「エネルギー使用合理化技術戦略的開発/エネルギー有効利用基盤技術先導的研究開発/エネルギー・CO<sub>2</sub> ミニマム(ECM)セメント・コンクリートシステムの研究開発」の一環として実施したもので、関係各位に感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 米澤敏男ほか：高品質再生粗骨材製造技術の研究，材料，Vol.50，No.8，pp.835-842，2001.8
- 2) 辻大二郎ほか：偏心ロータ式処理装置により製造した再生骨材及び再生コンクリートの性質，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.1539-1544，2004
- 3) 立屋敷久志ほか：解体コンクリートからの高品質再生骨材の回収試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.1099-1104，2000