# 論文 遊星ミルで製造した再生細骨材と微粉の性質

池尾 陽作\*1·蓮見 孝志\*1·米澤 敏男\*2

要旨:遊星ミルを用いて再生細骨材を製造し、製造条件が骨材品質に及ぼす影響を評価した。また、再生細骨材製造時に発生する微粉の粒径と成分の関係を調べた。その結果、遊星ミルでの再生細骨材製造において、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いること、処理速度等の処理条件を適切に設定することで再生細骨材 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された。再生細骨材製造時に発生する微粉に関しては、粒径と成分には密接な関係があり、粒径が小さいほどセメント硬化体成分が多いことから、分級によりセメント硬化体成分と骨材成分に分離できることが確認された。

キーワード:再生骨材、細骨材、微粉、遊星ミル、すりもみ処理、分級

#### 1. はじめに

平成 20 年度の建設副産物実態調査によると、平成 7 年度以降、建設副産物の排出量は減少傾向にある。しかし、解体コンクリート塊の排出量は 3000 万 t 以上で推移しており、建設副産物全体に占める解体コンクリート塊の割合は増加する傾向を示している。また、解体コンクリート塊の再資源化率は高い数値を示しているが、路盤材としての用途が多くを占めており、その需要は低下しつつある。そのため、コンクリートからコンクリートへのリサイクルの実現が求められている。

コンクリート用再生骨材の製造技術に関しては、各種の研究が行われ<sup>1)2)</sup>、実用化が進められている。しかし、再生骨材の普及に際しては、再生細骨材製造時に大量発生する微粉の処理が問題になる。そのため、再生細骨材の製造技術とともに再生細骨材製造時に発生する微粉に関する検討が必要とされている<sup>3)</sup>。

筆者らは、連続遊星ミル型の再生細骨材製造装置を開発し、遊星ミルの形式で再生細骨材の製造が可能であることを示した<sup>4)</sup>。遊星ミルでの再生細骨材製造においても微粉が発生するため、再生細骨材と同様に微粉の性質を把握しておく必要がある。本報では、遊星ミルでの再生細骨材製造において、骨材品質に及ぼす製造条件の影響を評価するとともに、再生細骨材製造時に発生した微粉を分級し、微粉の粒径と成分の関係を調べた。

### 2. 遊星ミルによる再生細骨材の製造実験

# 2.1 連続遊星ミル

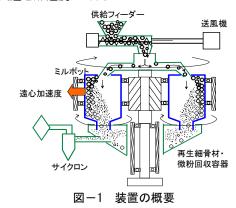
実験に用いた連続遊星ミル型の再生細骨材製造装置の概要を図-1,装置の外観を写真-1に示す。また,再生細骨材の製造原理を図-2に示す。本装置は,解体コンクリートから粗骨材を取り除いた後に残った細粒(以

降,細粒と呼ぶ)を原料とし、自転公転するミルポット 内で細粒同士のすりもみにより表面のセメント硬化体 を除去する。また、すりもみにより発生した微粉を送風 によりミルポット内から排出する機構を備えている。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

·最大遠心加速度:200G





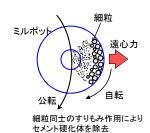


写真-1 装置の外観

図-2 製造原理

# 2.2 実験の因子と水準

実験の因子と水準を表-1 に示す。原料となる細粒の 粒度,ミルポットへの送風速度,遠心加速度,処理速度 を因子とした。

\*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)

表-1 実験の因子と水準

因子	水準	
細粒の粒度	全体(0~5mm), 0.6mm 以上(0.6~5mm)	
送風速度	0.42m/s, 0.63m/s	
遠心加速度	80G, 115G, 150G	
設定処理速度**	5kg/h, 10kg/h, 15kg/h, 20kg/h, 25kg/h, 50kg/h	

※細粒の粒度 0~5mm では 5~15kg/h の 3 水準とした

#### 2.3 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、その後に発生した細粒を使用した。細粒の品質を表-2 に示す。

表-2 細粒の品質

全体		粒度 0.6mm 以上	
絶乾密度	吸水率	絶乾密度	吸水率
(g/cm <sup>3</sup> )	(%)	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)
2.08	10.42	2.16	8.78

### (2) 処理方法

連続遊星ミル型再生細骨材製造装置を用いて各条件で細粒の処理を行った。図-3 に再生細骨材の回収フローを示す。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。遠心加速度は自転数と公転数により調整し、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。



図-3 再生細骨材の回収フロー

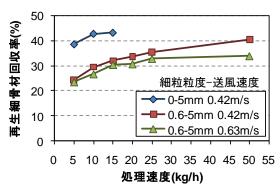
# (3) 評価方法

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 以上の粒子を再生細骨材とし, JIS A 1109 に従って密度・吸水率を測定した。密度・吸水率測定用の試料採取の際, 粒子表面についた微粒分は水洗して除去した。

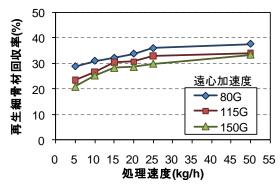
# 2.4 実験結果

### (1) 再生細骨材回収率

処理速度と再生細骨材回収率の関係を図-4(a), (b) に示す。再生細骨材回収率は、原料を細粒全体とした場合、再生細骨材/処理回収物(重量%)とした。原料を細粒の 0.6mm 以上とした場合には、細粒 0.6mm 以上/細粒全体×再生細骨材/処理回収物(重量%)とすることで、原料を細粒全体とした場合と比較できるようにした。



(a) 細粒粒度, 送風速度の影響 (遠心加速度 115G)

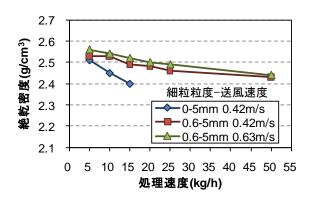


(b) 遠心加速度の影響(送風速度 0.63m/s, 細粒粒度 0.6~5mm) 図-4 処理速度と再生細骨材回収率の関係

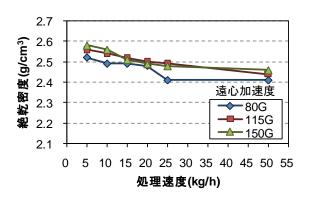
再生細骨材回収率は、すべての条件において処理速度が速くなるほど高くなる傾向を示した。細粒の粒度に関しては、0~5mm に比べ 0.6mm 未満を除去した 0.6mm~5mm の場合に回収率が大きく低下した。また、ミルポットへの送風速度が速いほど回収率が低くなった。ミルポット内に微粒子が多く存在する場合、微粒子が緩衝材として働くことや再付着の影響により細粒同士のすりもみが進行しない 4。したがって、見かけ上再生細骨材の回収率が増加する。一方、細粒の 0.6mm 未満の粒子を除くこと、ミルポット内への送風速度を速くすることで、ミルポット内の微粒子が少なくなり、細粒同士のすりもみが促進したと考えられる。遠心加速度の影響に関しては、遠心加速度が大きくなるほど回収率が低下する傾向が認められ、150G で処理速度 5kg/h の場合に回収率が20%程度まで低下した。

### (2) 密度·吸水率

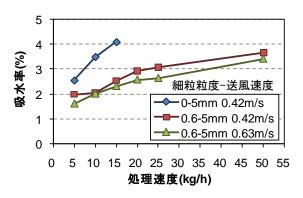
処理速度と絶乾密度の関係を図-5(a), (b)に示す。 処理速度が速くなるほど密度が低くなる傾向を示した。 細粒粒度については, $0.6\sim5$ mm の方が密度が高く, $0\sim5$ mm の場合は,処理速度を速くすると密度が大きく低下したのに対し, $0.6\sim5$ mm の場合はその傾向は小さかった。また,ミルポットへの送風速度が速い場合に密度が高くなった。遠心加速度に関しては,80G に比べ 115G,150G の方が密度が高くなった。遠心加速度 115G,150G では,送風速度 15kg/h まで



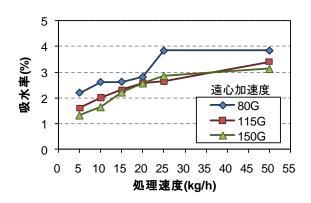
(a) 細粒粒度, 送風速度の影響 (遠心加速度 115G)



(b) 遠心加速度の影響(送風速度 0.63m/s, 細粒粒度 0.6~5mm) 図-5 処理速度と絶乾密度の関係



(a) 細粒粒度、送風速度の影響(遠心加速度 115G)



(b) 遠心加速度の影響(送風速度 0.63m/s, 細粒粒度 0.6~5mm) 図ー6 処理速度と吸水率の関係

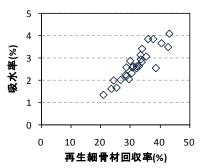


図-7 再生細骨材回収率と吸水率の関係

で再生細骨材 H (JIS A 5021) の規格値 (2.5g/cm³以上) を満足した。処理速度と吸水率の関係を図ー6(a), (b) に示す。処理速度が速くなるほど吸水率が高くなる傾向を示した。また、細粒の粒度が粗く、ミルポットへの送風速度が速い場合に吸水率は低くなった。遠心加速度の影響では、80Gに比べ115Gの方が吸水率が低く、115Gと150Gの差は小さかった。送風速度0.63m/sの場合に、115G,150Gでは処理速度50kg/hまでで再生細骨材 H(JIS A 5021) の規格値(3.5%以下)を満足した。連続遊星ミルでの再生細骨材製造では、細粒粒度、送風速度、遠心加速度を調整することで、処理速度が速い場合でも、再生細骨材の品質を確保することが可能である。

再生細骨材回収率と吸水率の関係を**図**-7 に示す。回収率が低いほど吸水率が低くなる傾向が認められた。細粒同士のすりもみ作用が進行するほどセメント硬化体が除去されるため,吸水率が低くなったと考えられる。今回使用した細粒の場合,回収率 35%以下の場合はすべて再生細骨材 H の規格値である 3.5%以下を満足した。

# 3. 微粉の性質に関する実験

### 3.1 微粉の回収方法

# (1) 微粉の回収フロー

本研究では、2.1 で示した連続遊星ミルで細粒を処理した後に発生する 0.6mm 未満の粒子を微粉とした。図-8 に微粉の回収フローを示す。



# (2) 連続遊星ミルでの細粒の処理と微粉の回収

細粒の処理条件を表-3 に示す。この処理条件で得られた再生細骨材は再生細骨材 H (JIS A 5021) の規格値を満足するものではなかったが、微粉に関しては細粒同士のすりもみ作用により発生したものであり、遊星ミルで回収される微粉の基本的な性質を有していると考えら

れる。2 種類の細粒について処理を行い、0.6mm 未満の 微粉を回収した。本研究に使用した微粉の種類を表-4 に示す。

表-3 細粒の処理条件

項目	条件	
細粒の粒度	全体(0~5mm)	
送風速度	0.42m/s	
遠心加速度	115G	
設定処理速度	10kg/h	

表-4 微粉種類

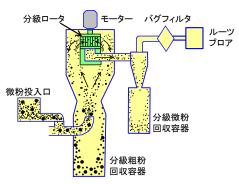
記号	微粉原料(細粒)	細粒の 保管期間**
A	解体コンクリート:偏心ロータ式	8 か月
	再生粗骨材製造装置で処理	
В	モルタル(W/C=50%,C/S=1/3):	3 週間
	ジョークラッシャーで粉砕	

※細粒製造から微粉製造(遊星ミルでの処理)の期間

# 3.2 微粉の分級方法

#### (1) 分級装置

回収した微粉を分級装置により分級した。装置の概要を図-9 に示す。本装置は、円筒状の分級ロータを高速回転させる遠心力式風力分級装置である。分級ロータを高速回転させることで発生する旋回気流による遠心力と吸引空気の向心力のバランスにより分級点が定まる機構を有しており、分級ロータの回転数を変えることで分級点を調整することができる。



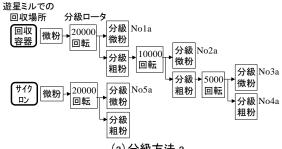
分級ロータ直径:50mm分級ロータ最大回転数:20000rpm

図-9 分級装置の概要

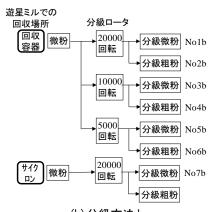
# (2) 分級方法

微粉の分級方法を図-10 に示す。2 種類の方法で微粉を分級した。分級方法 a では、微粉を分級した後に得られた分級粗粉を分級ロータの回転数を変化させて段階

的に分級した。分級方法 b は、同一原料(微粉)をロータの回転数を変化させて分級した。



(a) 分級方法 a



(b) 分級方法 b 図-10 分級方法

# 3.3 微粉の評価

測定項目を表-5 に示す。微粉の粒度分布、セメント硬化体成分含有率、水酸化カルシウム含有率、炭酸カルシウム含有率を測定した。微粉に含まれる鉱物成分も調べた。セメント硬化体成分に関しては、塩酸処理後に炭酸ナトリウム水溶液で処理して不溶残分を求め、不溶残分を骨材成分とみなし、可溶分をセメント硬化体成分とした。水酸化カルシウムは DTA の吸熱ピークの温度範囲、炭酸カルシウムは 600℃~800℃の範囲から求めた。

表一5 測定項目

測定項目	測定方法	
粒度分布	レーザー回折・散乱式粒	
	度分布測定装置	
セメント硬化体成分含有率	不溶残分測定 5)	
水酸化カルシウム含有率	TG-DTA	
炭酸カルシウム含有率	TG-DTA (600°C∼800°C)	
鉱物成分	X 線回折	

# 3.4 実験結果

# (1) 粒度分布

表-4 に示す微粉 A を分級方法 a で分級した後の粒度

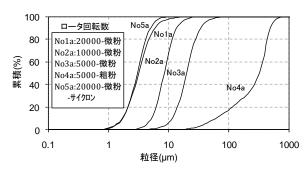


図-11 分級後の粒度分布(分級方法 a, 微粉 A)

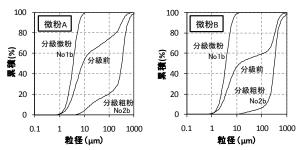


図-12 分級前後の粒度分布(分級方法 b, 20000 回転)

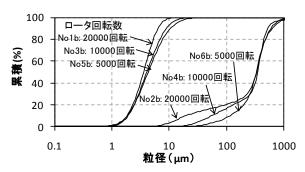


図-13 分級後の粒度分布(分級方法 b, 微粉 A)

分布を図-11 に示す。微粉の最小粒径は約 1 μ m であった。分級ロータの回転数を変化させることで微粉を各粒度に分級することができ,分級ロータの回転数が多いほど粒径が小さくなった。また,遊星ミルでの微粉回収場所の違いでは,回収容器で回収された微粉に比べサイクロン捕集された微粉を分級した方が,粒径がやや小さくなった。

分級方法 b で分級した微粉 A, 微粉 B の分級前後の粒度分布を図-12 に示す。分級により微粉 A, 微粉 B とも平均粒径(累積 50%粒子径)が大きく異なる 2 つの分布に分かれた。図-13 に微粉 A の分級後の粒度分布を示す。分級ロータ回転数が多いほど分級微粉の粒径が小さくなる傾向を示したが、図-11 の分布と比べると分級ロータ回転数による差は小さかった。

### (2) 微粉の成分

分級方法 a で分級した微粉 A のセメント硬化体成分含 有率を図-14 に示す。累積が 50%の粒子径を平均粒径と した。平均粒径が小さいほどセメント硬化体成分の含有

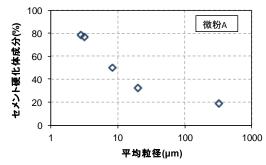


図-14 セメント硬化体成分含有率(分級方法 a)

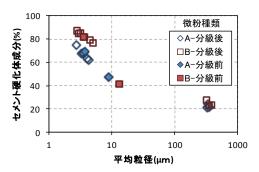


図-15 セメント硬化体成分含有率 (分級方法 b)

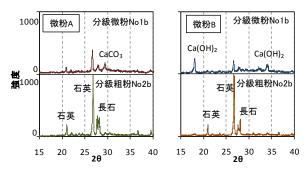


図-16 X線回折結果(分級方法b, 20000回転)

率が高くなった。図-15に分級方法 b で分級した微粉 A と微粉 B のセメント硬化体成分含有率を示す。微粉 A, B とも平均粒径が小さいほどセメント硬化体成分の含有率が高くなり、微粉 A に関しては粒径とセメント硬化体成分の関係は図-14 の分級方法 a とほとんど同じであった。いずれの分級方法においても、粒径と微粉中のセメント硬化体成分には密接な関係があり、分級によってセメント硬化体成分と骨材成分の分離が可能であることを示している。セメント硬化体は骨材に比べて軟らかいため、遊星ミルでの処理過程で選択的に粉砕されて細かくなったと考えられる。

図-10(b)の分級微粉 No1b と分級粗粉 No2b の X 線回 折結果を図-16に示す。微粉 A, B とも分級粗粉では骨 材成分の石英や長石のピークが目立つが, 粒径の小さな分級微粉は分級粗粉に比べ骨材成分のピーク高さが低くなり, セメント硬化体成分中の水酸化カルシウムや炭酸カルシウムのピークが顕著になった。このことからも

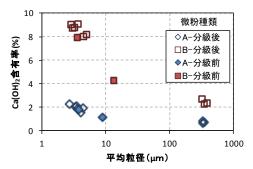


図-17 Ca(OH)<sub>2</sub>含有率(分級方法 b)

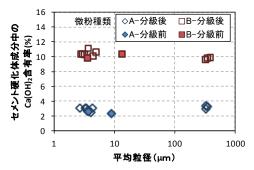


図-18 微粉のセメント硬化体成分中の Ca(OH)<sub>2</sub>含有率 (分級方法 b)

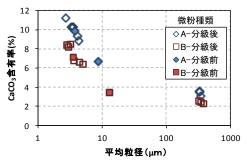


図-19 CaCO3含有率(分級方法b)

分級によりセメント硬化体成分と骨材成分が分離されていることがわかる。また、微粉 A の分級微粉では炭酸カルシウムのピークが目立つのに対し、微粉 B の分級微粉では水酸化カルシウムのピークが顕著であった。微粉 A の原料である細粒は、建物解体時に発生した解体コンクリートであり、経年変化により中性化が進行していたことが考えられる。また、細粒の保管期間が 8 か月と長く、降雨にさらされたことも中性化の進行に影響を及ぼした可能性がある。

微粉の水酸化カルシウム含有率を図-17 に示す。微粉 A,B とも粒径が小さくなるほど含有率が高くなる傾向を示した。微粉 B は,平均粒径約  $3\mu$  m で含有率 8%以上であった。一方,微粉 A は,水酸化カルシウム含有率が低く,平均粒径約  $3\mu$  m で含有率は 2%程度であった。図-18 に微粉のセメント硬化体成分中の水酸化カルシウム含有率を示す。平均粒径が変化してもセメント硬化体

成分中の水酸化カルシウム含有率はほぼ一定で、微粉 A が約 3%、微粉 B は約 10%であった。微粉 A が中性化して水酸化カルシウム成分が減少しているためと考えられ、図-16 の X 線回折の結果と一致している。微粉の炭酸カルシウム含有率を図-19 に示す。微粉 A, B とも粒径が小さくなるほど含有率が高く、微粉 A が微粉 B に比べて含有率が高かった。微粉の中性化が影響していると考えられる。

### 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製造では、処理速度、細粒粒度、ミルポット内への送風速度、遠心加速度を適切に設定することで再生細骨材 H の JIS 規格値を満足する再生細骨材が得られる。

(2)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が再生細骨材の品質に大きな影響を及ぼす。

(3)遊星ミルでの再生細骨材製造時に回収された微粉の 粒径と成分には密接な関係があり、粒径が小さいほどセ メント硬化体成分が多い。

(4)再生細骨材製造時に回収された微粉を分級することによりセメント硬化体成分と骨材成分に分離できる。

(5)微粉の粒径が小さいほど水酸化カルシウムや炭酸カルシウムの含有率は高くなるが、その含有率は処理原料である細粒の種類により異なる。

# 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

- 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
- 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
- 3) 内山伸ほか:加熱すりもみ処理したコンクリート微 粉末に関する研究(その1)(その2),日本建築学 会大会学術講演梗概集,pp.379-382,2003
- 4) 池尾陽作ほか: 遊星ミルによる再生細骨材製造技術 に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1427-1432, 2010
- 5) 浅賀喜与志ほか:セメントー石英系水熱反応における未反応石英の定量,窯業協会誌,90,pp.397-400, 1982