

2) ECMセメント用再生微粉製造技術の研究

2) Study on Technology of Producing Recycled Concrete Powder for ECM Cement

池尾 陽作 Yousaku Ikeo*1

蓮見 孝志 Takashi Hasumi*2

米澤 敏男 Toshio Yonezawa*3

梗概

再生骨材製造時に発生する微粉の利用を目的として、高炉スラグを主成分とするエネルギー・CO₂ミニマム（ECM）セメントに用いる再生微粉の製造について検討を行った。遊星ミルで製造した再生細骨材と再生微粉の性質を調べるとともに、再生微粉がモルタルの強度におよぼす影響を評価した。その結果、遊星ミルでの再生細骨材製造において、処理速度等の製造条件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ことを確認した。また、再生微粉の粒径が小さいほどセメント硬化体成分が多くなること、再生微粉の粒径はモルタルの強度に影響をおよぼすことを明らかにした。

キーワード：再生微粉，再生骨材，細骨材，遊星ミル，すりもみ処理，分級

Summary

The Energy and Carbon dioxide Minimum (ECM) cement consists of blast furnace slag, recycled concrete powder and so on. This paper discusses the production technique for recycled concrete powder from crushed concrete. Properties of recycled fine aggregate and concrete powder produced using a planetary mill were investigated. In addition, the strength of mortar with recycled concrete powder was evaluated. The water absorption of the recycled fine aggregate was satisfied with the quality required in JIS A 5021. The cement paste content in recycled concrete powder increased with decrease in average particle size of powder. The strength of mortar with recycled concrete powder was found to be influenced by the particle size of the powder.

Keywords: recycled aggregate, fine aggregate, concrete powder, planetary mill, rubbing process, classification

1 はじめに

建設廃棄物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おり、2008年には約50%に達している。従来、解体コンクリート塊は、路盤材などとして利用されてきた。しかし、路盤材としては、他産業からの廃棄物も利用されるようになり、需要は減少してきている。そのため、解体コンクリートを路盤材以外に再利用するための技術が求められている。

こうした中、解体コンクリートからの再生骨材製造技術の開発が進み^{1), 2)}、再生骨材のJISも制定されたことから、コンクリート用骨材としての利用推進が期待されている。しかし、再生骨材の普及に際しては、再生骨材製造時に大量に発生する微粉（以降、再生微粉と呼ぶ）の処理が問題になるため、再生微粉の利用用途に関する検討が行われている³⁾。現在開発を進めているエネルギー・CO₂ミニマム（ECM）セメント（以降、ECMセメントと呼ぶ）は、高炉スラグを主成分とした低環境負荷型のセメントである。再生微粉はセメント硬化体由来のアルカリ分を含んでいることから、再生微粉をECMセメントに利用することで、高炉スラグの反応促進が期待される。そのため、再生微粉のECMセメントへの

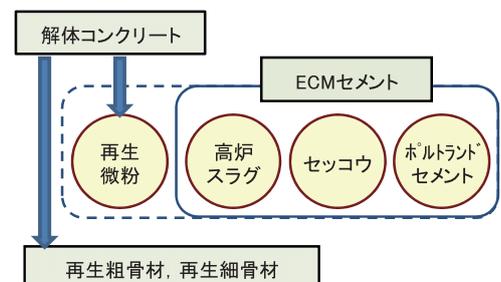


Fig.1 ECMセメントとコンクリートリサイクルの関係
Relation between ECM cement and recycling of concrete

*1 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

*2 東京本店 技術部 Tokyo Main Office

*3 技術研究所 リサーチフェロー・Ph.D Research Fellow, Research & Development Institute, Ph.D

利用は、コンクリートリサイクルの推進とセメントのCO₂削減につながる (Fig.1)。

本研究では、再生骨材製造時に発生する再生微粉のECMセメントへの利用を目的として、再生微粉の製造に関して検討を行った。これまでに筆者らが開発した遊星ミル型の再生細骨材製造装置^{4), 5)}を用いて製造した再生微粉の性質を調べるとともに、再生微粉がモルタルの強度におよぼす影響を評価した。

2 再生微粉の製造フローと製造装置

2.1 再生微粉の製造フロー

本研究での再生微粉の基本的な製造フローをFig.2に示す。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¹⁾を用いて粗骨材を回収し、粗骨材製造時に発生した細粒（以降、細粒と呼ぶ）を連続遊星ミルで再生細骨材と再生微粉に分離した。さらに、再生微粉を分級装置で分級することで分級再生微粉を製造した。

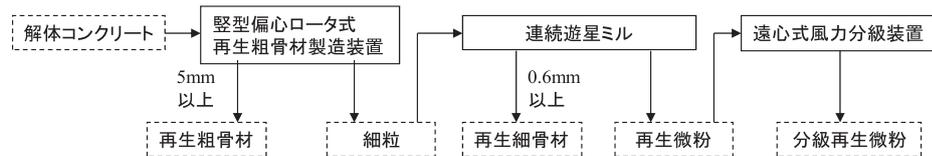


Fig.2 再生微粉の製造フロー
Flow diagram of producing recycled concrete powder

2.2 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外観をPhoto 1、装置の概要をFig.3に示す。本装置は、細粒を原料とし、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



Photo 1 遊星ミルの外観
Photo of the planetary mill

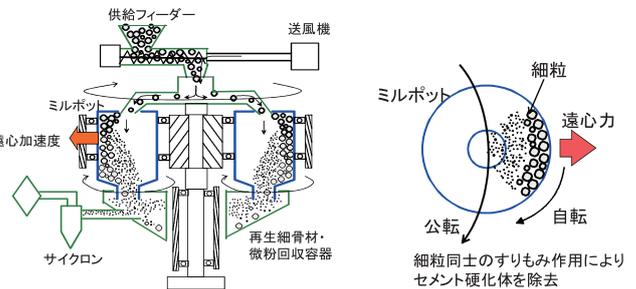


Fig.3 遊星ミルの概要
Schematic diagram of the planetary mill

2.3 分級装置

分級装置の概要をFig.4に示す。実験では、円筒状の分級ロータを高速回転させる遠心式風力分級装置を用いた。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内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。分級ロータの回転数が多いほど分級点が小さくなる。

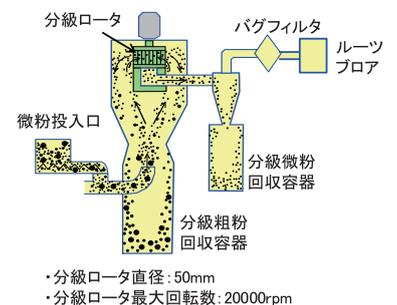


Fig.4 分級装置の概要
Schematic diagram of the separator

3 連続遊星ミルによる再生細骨材と再生微粉の分離

3.1 実験概要

連続遊星ミルで細粒の処理を行い、再生細骨材の回収率と再生細骨材の吸水率を調べた。実験の因子と水準をTable 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、および処理速度を因子とした。実験に用いた細粒の吸水率は、0～5mmで10.42%、0.6～5mmで8.78%であった。

Table 1 実験の因子と水準
Experimental conditions

因子	水準
細粒粒度	全体 (0～5mm), 0.6mm以上 (0.6～5mm)
送風速度	0.42m/s, 0.63m/s
設定処理速度	5kg/h, 10kg/h, 15kg/h, 20kg/h, 25kg/h, 50kg/h

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、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。遠心加速度は自転数と公転数により調整し、115Gとした。

各条件で細粒の処理を行った後、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。

3.2 実験結果

処理速度と再生細骨材回収率の関係をFig.5に示す。再生細骨材回収率は、処理速度が速くなるほど高くなる傾向を示した。細粒粒度が0～5mmの場合に比べて0.6mm未満を除去した0.6～5mm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。今回の実験の範囲では、再生細骨材の回収率は23～43%、したがって再生微粉の回収率は77～57%であった。

処理速度と吸水率の関係をFig.6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。遊星ミルによる細粒の処理では、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³⁾。細粒の0.6mm未満の粒子を除くこと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されたため、骨材表面のセメント硬化体が除去されて吸水率が低くなったと考えられる。細粒粒度0.6mm以上で送風速度0.63m/sの場合は、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。

細粒のミルポット内での状態を把握するため遊星ミルを駆動するモーターの電流値を測定した。電流値の変化をFig.7に示す。細粒5kgを処理する間の電流変化を示しており、処理速度が速いほど短時間で細粒の処理が終了した。電流値はいずれの場合も処理開始と同時に上昇し、最大値に達した後やや低下する傾向を示した。また、処理速度が速いほど電流変化が大きかった。処理開始後に電流値が上昇している間は、細粒の供給に伴ってミルポット内の細粒の量が増加していることを示しており、電流値が最大値を示した後はミルポットから分離された材料の排出が始まってミルポット内の材料が一定量になっていることを示していると推測される。そのため、最大値までの時間が細粒のミルポット滞留時間と考えられる。滞留時間は処理速度が遅いほど長く、処理速度5kg/hで32分、処理速度10kg/hで14分、処理速度50kg/hで4分であった。滞留時間が長いほど細粒同士のすりもみが進行するため、滞留時間が長い条件である処理速度が遅いほど吸水率が低くなったと考えられる。

4 再生微粉の性質

4.1 実験概要

本研究では遊星ミルで細粒を処理した後に発生する0.6mm未満の粒子を再生微粉とした。その再生微粉を分級装置で分級し、粒径と成分の関係を調べた。実験に用いた再生微粉の種類をTable 2に示す。

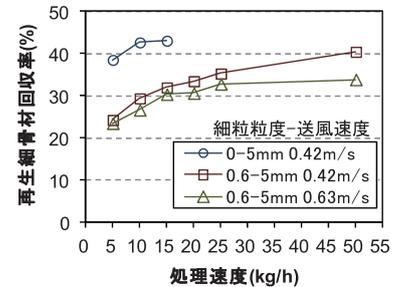


Fig.5 処理速度と再生細骨材回収率の関係
Recovery rate of recycled fine aggregate

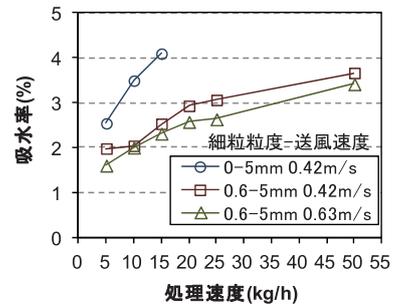


Fig.6 処理速度と吸水率の関係
Water absorption of recycled fine aggregate

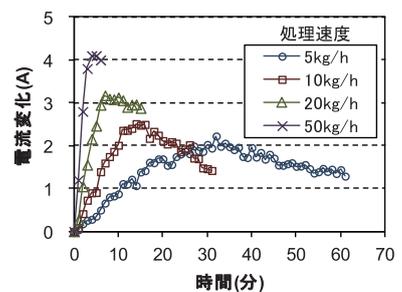


Fig.7 電流変化
Variation of current with time

Table 2 再生微粉の種類
Type of recycled concrete powder

記号	微粉原料（細粒）*	遊星ミルでの処理条件			
		細粒粒度	送風速度	処理速度	遠心加速度
I	解体コンクリート①	0～5mm	0.42m/s	10kg/h	115G
II	モルタル（W/C=55%, C/S=1/2.5）	0～5mm	0.63m/s		
III	解体コンクリート②	0.6～8mm			

*解体コンクリートは偏心ロータ式再生粗骨材製造装置での処理，モルタルはジョークラッシャーで粉碎して細粒を回収した

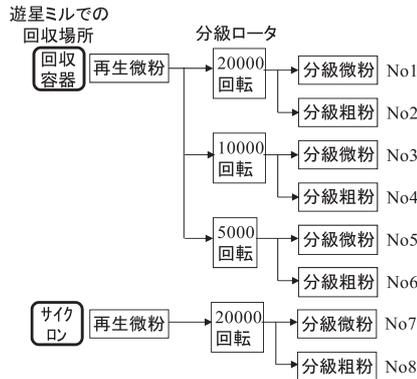


Fig.8 分級方法
Separation conditions of recycled concrete powder

Table 3 測定項目
Test item of recycled concrete powder

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 ⁶⁾
水酸化カルシウム含有率	TG-DTA
鉱物成分	X線回折

I～IIIの再生微粉を2.3に示した分級装置で分級した。分級方法をFig.8に示す。分級ロータの回転数を変化させて遊星ミルで回収した再生微粉を分級した。遊星ミルでの再生微粉の回収場所は，再生細骨材・微粉回収容器とサイクロンの2か所があるため，回収場所が異なる再生微粉については，それぞれ分級を行った。

分級前後の再生微粉に関してTable 3に示す項目の分析を行った。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。

4.2 実験結果

分級前後の粒度分布をFig.9に示す。分級により平均粒径（累積50%粒径）が大きく異なる2つの分布に分かれた。また，分級前の粒度分布は再生微粉の種類で異なるが，分級後に得られた粒径の小さい分級微粉の平均粒径は再生微粉の種類にかかわらずほぼ近い値を示した。

再生微粉のセメント硬化体成分含有率をFig.10に示す。再生微粉の種類にかかわらず，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った。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碎されて細くなったと考えられる。再生微粉の水酸化カルシウム含有率をFig.11に示す。いずれの再生微粉で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が，再生微粉IIの含有率に比べ再生微粉I，IIIの含有率は低かった。再生微粉I，IIIの原料である細粒は，建物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，細粒の保管期間中に降雨にさらされたことも中性化の

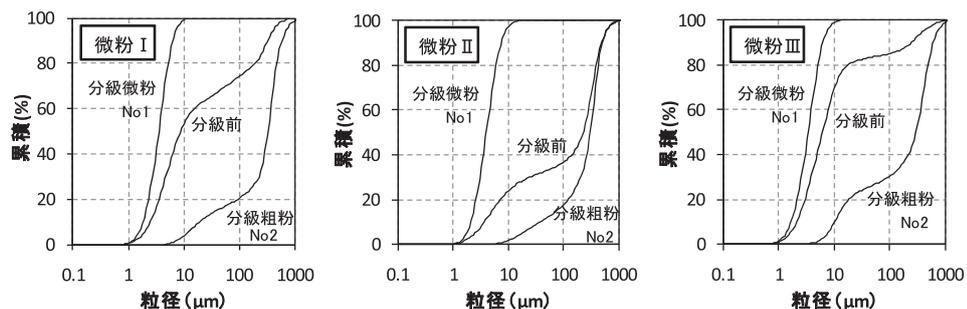


Fig.9 分級前後の粒度分布(分級ロータ回転数：20000回転)
Particle size distribution of recycled concrete powder

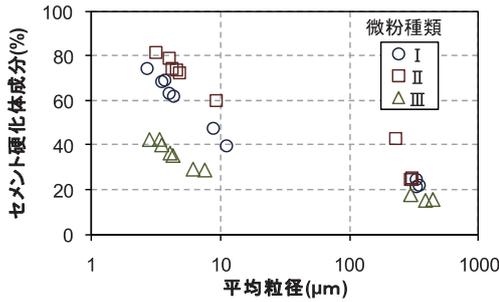


Fig.10 セメント硬化体成分含有率
Cement paste content in recycled concrete powder

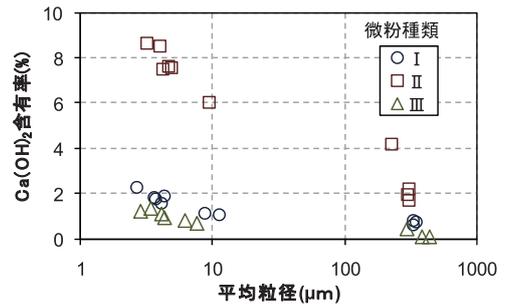


Fig.11 Ca(OH)₂含有率
Ca(OH)₂ content in recycled concrete powder

進行に影響をおよぼした可能性がある。

Fig.12に分級ロータ20000回転で分級した微粉と粗粉のX線回折結果を示す。分級粗粉では骨材成分の石英や長石のピークが目立つのに対し、分級微粉では骨材成分のピーク高さが低くなっており、セメント硬化体成分の水酸化カルシウムや炭酸カルシウムのピークが明確になった。

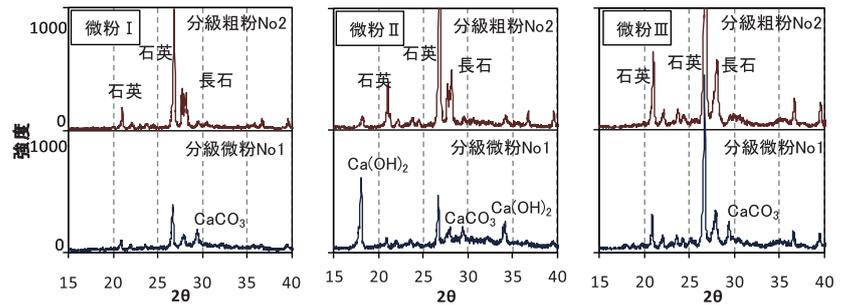


Fig.12 X線回折結果 (分級ロータ回転数: 20000回転)
X-ray diffraction pattern of recycled concrete powder

このことから、分級された粒径の小さな再生微粉はセメント硬化体成分を多く含有していることが確認された。また、再生微粉IIの分級微粉は水酸化カルシウムのピークが目立つのに対し、再生微粉IとIIIは水酸化カルシウムのピークは不明確で炭酸カルシウムのピークが顕著であった。Fig.11の結果と一致しており、中性化の影響と考えられる。

Fig.10において再生微粉IIIのセメント硬化体成分は再生微粉IとIIに比べて少なく、骨材成分が比較的多いことを示している。また、Fig.12においても再生微粉IIIの骨材成分のピークは顕著であった。遊星ミルでの細粒処理では、ミルポット内の微粒子が細粒同士のすりもみの進行に大きな影響をおよぼし、細粒の0.6mm未満の粒子を除く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される。さらに、ミルポット内の細粒の遠心力は質量に比例するため粒径が大きいほど大きく、粒径5~8mmの細粒は5mm以下の細粒に比べてすりもみ効果が大きくなる。再生微粉IIIの製造に用いた細粒粒度は0.6~8mmであり、細粒の処理が進行したため再生微粉に骨材成分が多く含まれたと推測される。再生細骨材の吸水率と分級微粉のセメント硬化体含有率をFig.13に示す。再生細骨材の吸水率が低いほど分級微粉のセメント硬化体成分含有率が低くなる傾向を示した。再生微粉IIIの製造時に回収した再生細骨材の吸水率はかなり低い値を示していることから、骨材表面のセメント硬化体が十分に除去されており、セメント硬化体の除去と同時に骨材表面の一部が磨砕されたと考えられる。

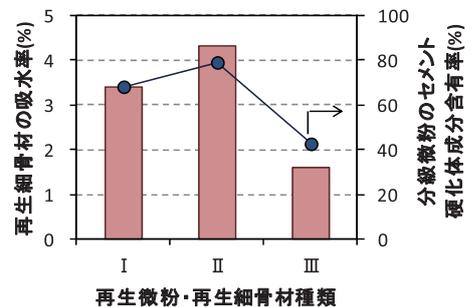


Fig.13 再生細骨材の吸水率と分級微粉のセメント硬化体成分含有率 (分級ロータ回転数: 20000回転)
Water absorption of recycled fine aggregate and cement paste contents in recycled concrete powder

5 再生微粉を用いたモルタルの強度特性

5.1 実験概要

再生微粉をセメント置換あるいは細骨材置換して作製したモルタルの強度を調べた。実験では再生微粉IIを用い、分級前の再生微粉と分級ロータ回転数20000回転で分級して得られた粒径の小さい再生微粉(分級微粉)を用いた。セメントは、普通セメント:高炉スラグ:無水石膏=32.0:63.0:5.0のECMセメント(密度:2.98g/cm³,比表面積:5160cm²/g)を用いた。セメント置換の場合は、再生微粉の置換率をセメントに対して5%,10%とし、細骨材置換

の場合は、置換率を細骨材に対して3.3%、10%とした。モルタルの作製、試験方法はJIS R 5201（セメントの物理試験方法）の「強さ試験」に準じた。

5.2 実験結果

モルタルの圧縮強度をFig.14に示す。セメント置換の場合は、再生微粉の置換により強度が低下する傾向が認められたが、分級微粉を用いた場合は強度の低下は小さかった。細骨材置換の場合は、再生微粉の置換により強度が増加し、置換率が高いほど強度が増加する傾向を示した。粒径の小さい分級微粉を置換した場合に特に大きな強度増加が認められた。セメント置換において、分級微粉使用時に強度低下が小さいのは、分級微粉は粒径が小さくセメント硬化成分が多いことから、分級前の再生微粉に比べて反応性が高いためと推測される。また、細骨材置換の際の強度増加は、細骨材に比べて粒径が小さい再生微粉を置換することで、硬化体組織が緻密化したことが原因の一つと考えられる。

モルタルの圧縮強度におよぼす再生微粉の影響をFig.15に示す。再生微粉を使用しない場合と分級微粉を置換した場合の強度を比較したものである。セメント置換ではわずかに強度が低下し、細骨材置換では顕著に強度が増加しているのが確認できる。細骨材置換において、材齢が経過するほど強度の比が小さくなる傾向が認められた。セメント置換でも、材齢初期では強度の低下がみられず、材齢が経過するとわずかに強度が低下していることから、再生微粉の効果は特に材齢初期で大きいと考えられる。

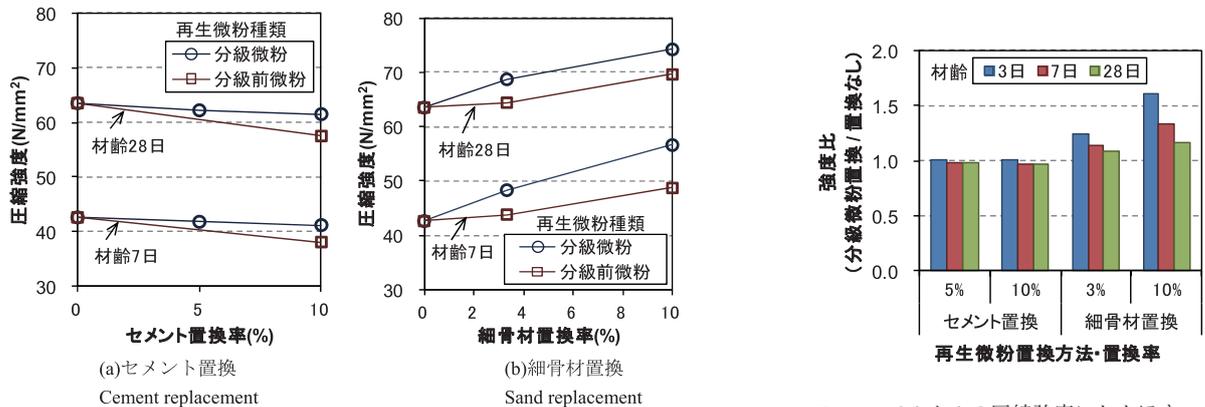


Fig.14 再生微粉を用いたモルタルの圧縮強度
Compressive strength of mortar with recycled concrete powder

Fig.15 モルタルの圧縮強度におよぼす再生微粉の影響
Effect of recycled concrete powder on compressive strength of mortar

今回の試験に用いたECMセメントは高炉スラグの含有率が63%であり高炉セメントのC種に相当する。再生微粉をセメント置換した場合の結果について、高炉セメントの圧縮強さの規格値（JIS R 5211）との比較をTable 4に示す。再生微粉を置換した場合は高炉セメントB種の高炉スラグ量に相当するが、いずれのJIS規格値も上回っており、この範囲の再生微粉の置換であれば強度の上では規格値を満足することがわかる。

ECMセメントの一部を再生微粉に置換することは、セメントのCO₂排出量をさらに低減することにつながる。また、再生微粉の細骨材置換は、ECMセメントモルタルの強度増加をもたらしたことから、再生微粉の用途として、ECMセメントとの組み合わせは有効性が高いと考えられる。

6 まとめ

遊星ミルで製造した再生細骨材と再生微粉の性質を調べた結果、以下のことがわかった。

- (1) 連続遊星ミルでの再生細骨材製造では、細粒粒度、送風速度を調整することで再生細骨材の品質を確保することが可能であり、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。

Table 4 モルタルの圧縮強度に関するJIS規格値との比較
Comparison mortar strength with JIS specifications

[単位: N/mm²]

材齢	再生微粉置換率				高炉セメントのJIS規格値	
	分級微粉		分級前		B種	C種
	0%	5%	10%	10%		
3日	25.0	25.2	25.1	21.3	≥10.0	≥7.5
7日	42.6	41.8	41.2	38.1	≥17.5	≥15.0
28日	63.5	62.2	61.5	57.5	≥42.5	≥40.0

- (2) 遊星ミルでの再生細骨材製造時に回収された再生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。
- (3) 遊星ミルで製造した再生細骨材の吸水率が低いほど、再生微粉の骨材成分が多くなる傾向がある。
- (4) 再生微粉を使用したモルタルの強度は、セメント置換の場合は置換率が増えるほど低下し、細骨材置換の場合は置換率が増えるほど増加する。また、分級により回収した粒径が小さい再生微粉を用いたモルタルの方が、強度発現が大きい。

本研究では、遊星ミルと分級装置により再生細骨材と再生微粉の製造が可能であること、また、再生微粉の利用用途としてECMセメントとの組み合わせが有効であることを示した。遊星ミルによる再生細骨材の製造条件と品質の関係、再生細骨材の品質と再生微粉の性質の関係についてはより詳細に検討する必要がある。今後は、それらの内容とともに、製造効率、再生微粉の反応メカニズム等について検討を進めていく予定である。

謝辞

本研究の一部は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・CO₂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、関係各位のご協力に感謝いたします。

参考文献

- 1) 米澤敏男, 神山行男, 柳橋邦生, 小島正朗, 荒川和明, 山田優: 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) 立屋敷久志, 岡本雅道, 西村祐介, 黒田泰弘: 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) 黒田泰弘, 片山行雄: 廃コンクリート微粉末混合セメントを用いたモルタル・コンクリートの研究, セメント・コンクリート論文集, No.64, pp.537-544, 2010
- 4) 池尾陽作, 米澤敏男, 蓮見孝志, 釜野博臣: 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) 池尾陽作, 蓮見孝志, 米澤敏男: 遊星ミルで製造した再生細骨材と微粉の性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1511-1516, 2011
- 6) 浅賀喜与志, 大沢栄也, 上西義介, 太田京一郎, 大門正機: セメント-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