

論文 湿式選別法による再生骨材及び再生微粉末の製造

松村 宇^{*1}・伊藤正澄^{*2}・平島 剛^{*3}・桂 修^{*4}

要旨: 湿式選別法による再生骨材製造システムのうち, 剥離に用いるアトリッションミルの条件による再生骨材, 再生微粉末の品質について検討を行った。結果, 再生骨材は吸水率がJISを満たすものを回収でき, 再生微粉末中の硬化セメント分の割合がアトリッションミルの条件により変化することが明らかとなった。さらに, 実証プラントにて再生骨材の製造実験を行い, 吸水率がJISを満たすものを回収できた。

キーワード: 湿式選別法, 高品質再生骨材, 再生微粉末, リサイクル, 蛍光X線分析

1. はじめに

建築系廃棄物の多くを占めるコンクリート廃材は, 現在, 路盤材にリサイクルされている。しかし, 資源循環の観点からすると再度コンクリートにリサイクルすることが必要と考える。

本研究では, 筆者らが開発する湿式選別法を用い, 建築物解体時に発生するコンクリート廃材を高度処理し, 建築構造体へ使用可能な再生骨材を製造することと, 同時に得られる再生微粉末をセメント原料とすること¹⁾で天然資源の保護, 石灰石使用量の削減によるセメント焼成時の二酸化炭素発生量の削減を目的とし検討を行っている。前報²⁾では, アトリッションミル³⁾により製造した再生細骨材を用い, ジグ³⁾による選別及びハイドロサイクロン³⁾による再生微粉末の品位向上について検討を行った。本報ではアトリッションミルによる再生粗骨材, 再生細骨材の一括製造実験及びハイドロサイクロンによる再生微粉末の品位の向上, 湿式選別法実証プラントによる再生骨材の製造について検討を行った。

2. 湿式選別法概要

ここで扱う湿式選別法では, アトリッション

ミル, ジグ, ハイドロサイクロンを組み合わせ, 再生骨材と再生微粉末を製造する。

アトリッションミルは, ミル内の羽根が高速回転することでコンクリート廃材に剥離作用を与え, 原骨材より強度の低い硬化セメント分を剥離する。剥離処理後の試料は原骨材粒子と硬化セメント粒子, その両方が付着した未剥離粒子が混在した状態にあり, これらを粒径に応じ, ジグ及びハイドロサイクロンを用いて選別する。

ジグは, 脈動水中の移動速度の差により, 粒子を比重の大小に従って成層させ, 分離する装置である。

ハイドロサイクロンは, 粒子に働く遠心力を利用し, 粒子密度が同じ場合は粒子径が大きい粒子を, また粒子径が同じ場合は密度が大きい粒子をアンダーフロー産物として, それ以外をオーバーフロー産物として回収する装置である。

3. 実験概要

剥離に用いるアトリッションミルの運転条件によっては骨材の粉碎が生じたり, 剥離が不十分な場合もあるため, アトリッションミルの最適運転条件について検討を行った。

また, 実証プラントによる再生骨材製造実験

*1 北海道立北方建築総合研究所 生産技術部技術材料開発科 (正会員)

*2 アグロ技術(株) 代表取締役

*3 九州大学大学院工学研究院 地球資源システム工学部門 工博

*4 北海道立北方建築総合研究所 生産技術部 博士(工学) (正会員)

を行い，再生骨材品質の検討を行った。

4. アトリッションミル要因が再生骨材及び再生微粉末に与える影響

4.1 実験計画

原材料となるコンクリート廃材は再生砕石(40～0mm)として市販されているものを使用した。

測定項目は密度及び吸水率，粒度分布，歩留まりとした。実験要因はローター回転数，飽和度，処理時間の3水準とした。飽和度は試料かさ容積より試料絶対容積を減じた空隙容積に対する投入水の体積比である。

要因間の交互作用を把握するため，実験計画法⁴⁾L8を用いた。これに処理時間を延長したものの，中間の飽和度のもの，ローター回転数を下げたものを加えて表-1に実験条件を示す。

再生砕石をアトリッションミルに投入し，処理後，縮分により等分し，それぞれを再生骨材試験と hidroサイクロン試験に供した。

再生骨材試験用試料は，5mm及び0.075mmふるいにてふるい分け，得られた+5mm試料を再生粗骨材，-5～+0.075mm試料を再生細骨材とし，各々の質量を測定した。得られた再生粗骨材，再生細骨材はそれぞれJIS A 1110，JIS A 1109による密度及び吸水率試験を行った。

hidroサイクロン試験用試料は，0.6mmふるいにてふるい分けを行い，得られた-0.6mm試料を試験に供した。

hidroサイクロン試験は，まず，4インチhidroサイクロンを用いアンダーフロー産物とオーバーフロー産物を回収した。オーバーフロー産物は更に2インチhidroサイクロンにて処理し，アンダーフロー産物とオーバーフロー産物を回収した。4インチhidroサイクロン試験はスラリー濃度10wt%，オーバーフロー産物出口であるVortex Finder Cap⁵⁾径を35mm，アンダーフロー産物出口であるSpigot Cap⁵⁾径を15mmとし，2インチhidroサイクロン試験はスラリー濃度5wt%，Voltex Finder Cap径を11mm，Spigot Cap径を9.4mmとした。各産物試料は105 乾燥

表 - 1 実験条件

記号	ローター回転数 (rpm)	飽和度	処理時間 (分)	条件
case.1	1000	0.38	10	実験計画法 L8
case.2			20	
case.3		0.70	10	
case.4			20	
case.5	800	0.38	10	
case.6			20	
case.7		0.70	10	
case.8			20	
case.9	1000	0.38	40	追加
case.10		0.55	10	
case.11			20	
case.12		40		
case.13	0.70	40		
case.14	600	0.70	20	

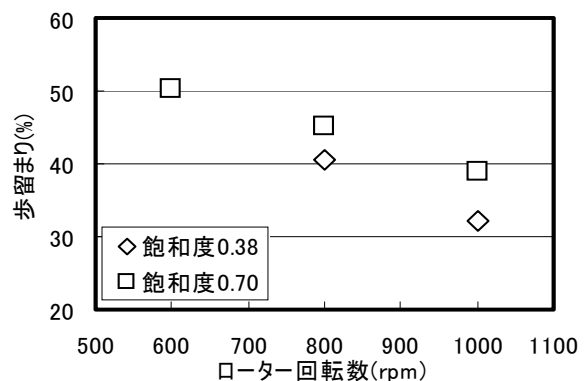


図 - 1 ローター回転数と歩留まりの関係 (再生粗骨材・処理時間 20 分)

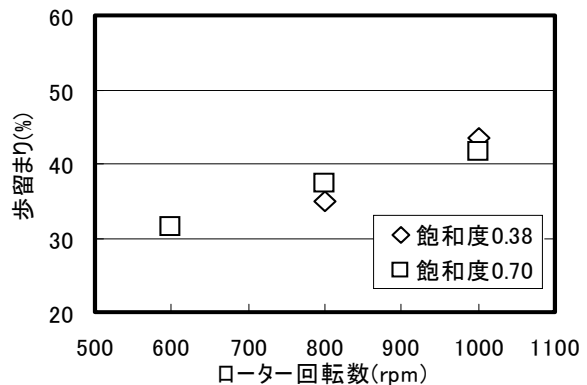


図 - 2 ローター回転数と歩留まりの関係 (再生細骨材・処理時間 20 分)

後，微粉碎したものを蛍光X線分析 Fundamental Parameter 法により定量分析を行った。

4.2 実験結果及び考察

実験計画法 L8 を用い，歩留まり，吸水率について検討を行った。交互作用はどの実験要因間にも認められなかった。有意水準が得られた要因と再生骨材品質の関係を次に示す。

(1) 再生粗骨材及び再生細骨材の歩留まり

再生粗骨材及び再生細骨材のローター回転数と歩留まりの関係を図 - 1 及び図 - 2 に示す。

ローター回転数の増加に伴い、再生粗骨材の歩留まりは減少するが、再生細骨材の歩留まりは逆に増加する。同一の回転数では、飽和度が高くなる場合に、再生粗骨材の歩留まりは増加する傾向を示すが、再生細骨材の歩留まりに変化は見られない。

(2) 再生粗骨材及び再生細骨材の吸水率

再生粗骨材及び再生細骨材の吸水率と処理時間の関係を図 - 3 及び図 - 4 に示す。再生粗骨材の吸水率は処理時間の増加に伴い減少するが、飽和度によりその程度は異なる。すなわち、処理時間 10 分及び 20 分では、飽和度 0.38 と低い場合の方が飽和度 0.70 と高い場合より吸水率が低いが、処理時間 40 分では逆転する。

飽和度 0.38 の場合、処理時間 20 分と 40 分の間ではほとんど吸水率の変化は認められないが、飽和度 0.70 の場合、処理時間 20 分と 40 分の間で吸水率は大きく低下する。

飽和度の増減は粉体層の流動性に影響を及ぼし、剥離処理後の産物の状態は処理時間、ローター回転数により異なる。飽和度の低い場合には、パサパサした状態からネバネバした状態でありファニキュラー状態⁶⁾からキャピラリー状態⁶⁾と思われる。飽和度の高い場合にはほとんどがスラリー状態⁶⁾になっていた。このような流動性の差が剥離条件に影響を及ぼしたものと考えられる。

再生粗骨材では硬化セメント分の剥離により吸水率は低下する。再生細骨材も硬化セメント分の剥離により低下するが、再生粗骨材の剥離過程で生じる、小さな未剥離粒子の増加等のため、処理時間の増加に伴い吸水率が単調に減少するわけではなく、複雑に変動する。

処理時間の増加は、粒子間、粒子とローター間、粒子と壁間の衝突回数を増大させる。ローター回転数の増加は、上記衝突回数を増大させると共に衝突強度も増大させる。これらの結果、再生粗骨材からのセメント分の剥離が進行する

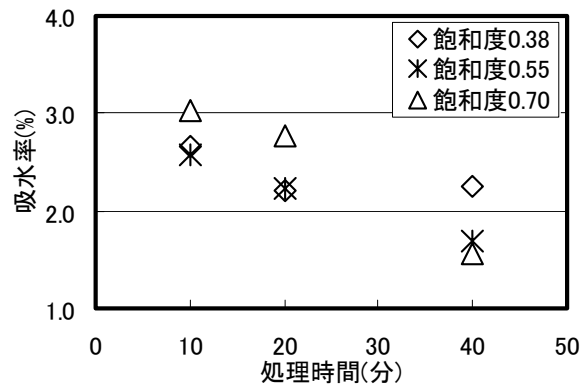


図 - 3 処理時間と吸水率の関係(再生粗骨材・ローター回転数 1000rpm)

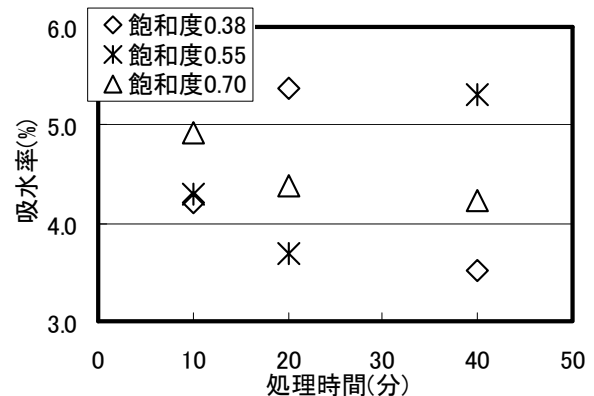


図 - 4 処理時間と吸水率の関係(再生細骨材・ローター回転数 1000rpm)

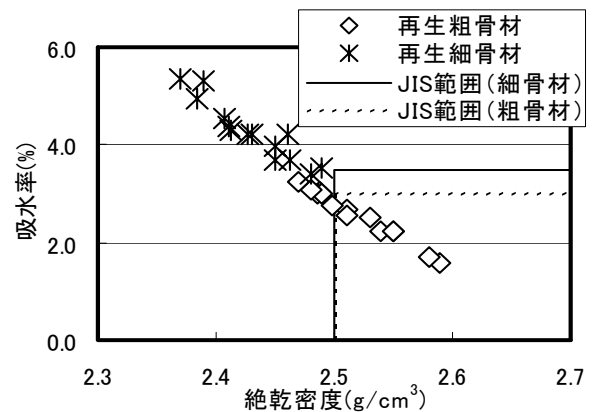


図 - 5 絶乾密度と吸水率の関係

と共に再生粗骨材の粉碎も進行するため、図 - 1 の再生粗骨材の歩留まりは減少するが、図 - 2 の再生細骨材の歩留まりは増加するものと考えられる。

アトリッションミルの処理で得られた再生粗骨材及び再生細骨材の密度と吸水率の関係を図 - 5 に示す。処理条件によって、再生粗骨材は JIS A 5308 に規定される絶乾密度及び吸水率の条件を満たすものも得られ、再生細骨材も JIS をほぼ満たすものも得られた。

(3) 再生微粉末中の硬化セメント分

-0.6mm 試料(4インチフィード試料)をハイドロサイクロン試験に供し,各分級過程での再生微粉末中の骨材分とセメント分の割合を蛍光X線分析結果より推定した。再生骨材中のCaOはセメントのみに由来し,セメントのCaOを65%,セメント質量の20%の水が反応したと仮定した。ハイドロサイクロン処理過程を図-6に示す。ハイドロサイクロン処理過程での硬化セメント分の割合と歩留まりの例について図-7に示す。

硬化セメント分の割合は4インチハイドロサイクロン処理後のオーバーフロー産物では平均で約11%増加し,2インチサイクロン処理後のオーバーフロー産物ではさらに約3%増加した。

処理時間及び飽和度の異なる試料から得られた4インチフィード試料に含まれる硬化セメント分の割合を図-8に示す。

アトリッションミルの条件により4インチフィード試料に含まれる硬化セメント分の割合は異なる。4インチフィード試料に含まれる硬化セメント分の割合は,飽和度の違いに関わらず処理時間の増加に伴い減少する。これは処理時間の増加により骨材の粉碎が進行し,再生微粉末に含まれる微細な骨材片が増えたことで硬化セメント分の割合が減少したものと考えられる。

この結果は,前述した再生骨材の実験結果の考察とも一致する。

5. 実証プラントによる再生骨材製造実験及びジグによる選別実験

5.1 実験概要

前章の検討結果を踏まえ,実証プラントによる再生骨材製造実験を行った。図-9に示すとおり,実験フローは湿式選別法の特徴である,アトリッションミルによる湿式剥離過程,ジグ及びハイドロサイクロンによる選別過程,一定比重未満の再生骨材を剥離処理まで戻し再処理を行う過程を含むものとした。

コンクリート廃材は,再生砕石(40~0mm)として市販されているものを使用した。再生砕石

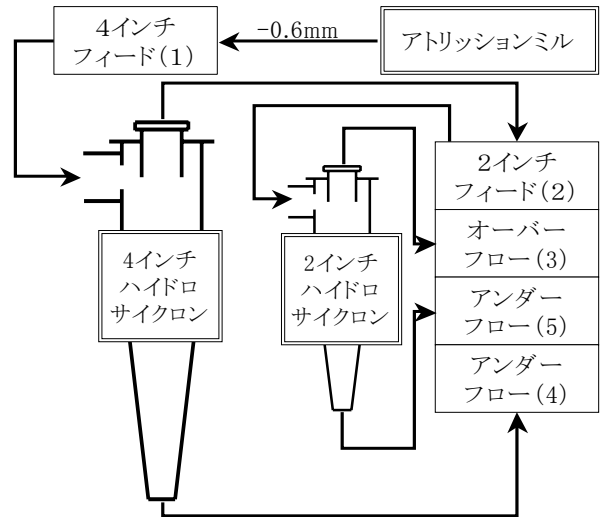


図-6 ハイドロサイクロン処理過程

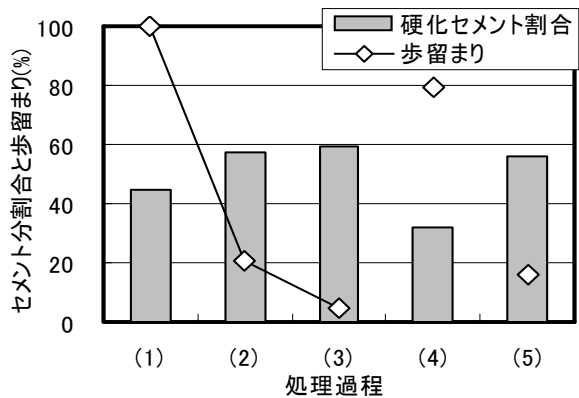


図-7 ハイドロサイクロン各処理過程での硬化セメント分と歩留まりの割合

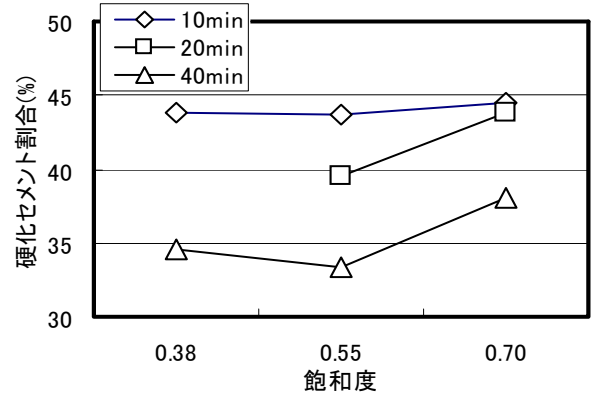


図-8 4インチフィード試料に含まれる硬化セメント割合と飽和度の関係(ローター回転数1000rpm)

をアトリッションミルに投入し,処理後,10mm,5mm,0.6mmふるいにてふるい分けを行った。アトリッションミル条件はローター回転数1000rpm,飽和度0.55,処理時間10分に設定した。得られた+10mm試料,-10~+5mm試料はジグ

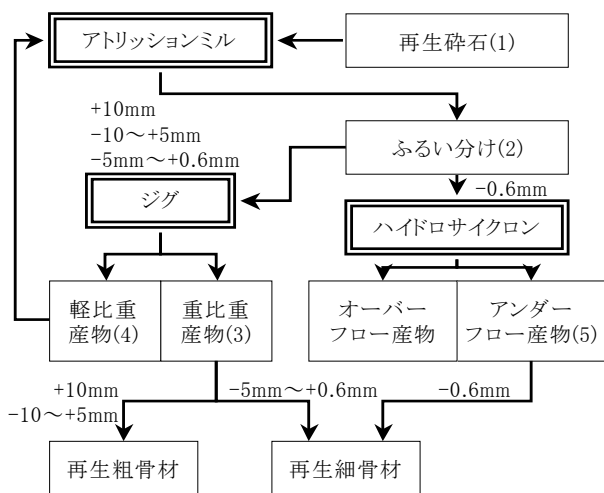


図 - 9 実験フロー

に投入し比重による選別処理を行った。但し、細骨材となる -5 ~ +0.6mm 試料は前章に示したように骨材と硬化セメント分の剥離が十分ではないため、再度アトリッションミルによる処理を行った後、0.6mm ふりいにてふるい分けを行い、ジグ処理を行った。

ジグ処理では比重で 2.5 をしきい値とした選別を行い、各試料を重比重産物及び軽比重産物として回収した。重比重産物は粒径に応じて再生粗骨材、再生細骨材とした。骨材と硬化セメント分の剥離が不十分な軽比重産物は、再度アトリッションミルに投入し、処理後、ふるい分けを行った。得られた試料は再度ジグ処理を行った。

アトリッションミル処理後の -0.6mm 試料は、4 インチハイドロサイクロンにて処理を行い、アンダーフロー産物を再生細骨材として回収した。

各フローで得られた試料は、JIS A 1110、JIS A 1109 による密度及び吸水率試験、JIS A 1102 によるふるい分け試験、質量測定を行った。

5.2 実験結果

フロー各段階での吸水率を図 - 10 及び図 - 11 に示す。図中処理過程の番号及び以下文中括弧の数字は図 - 9 の実験フロー中の番号と対応させている。アトリッションミル処理直後の粒径 0.6mm 以上の全試料は JIS A 5308 に規定する吸水率を満たした。更にジグによる処理を行った結果、+10mm 試料の重比重産物(3)及び -10 ~ +5mm 試料の重比重産物(3)の吸水率は大幅に低

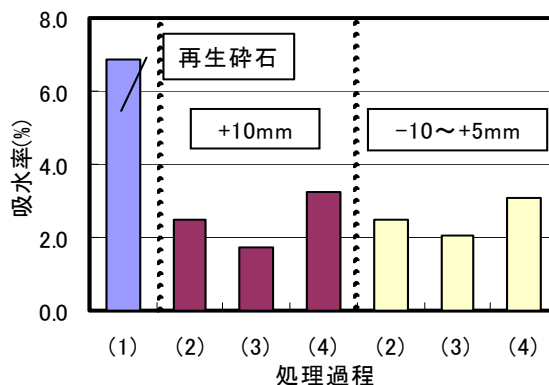


図 - 10 各フローでの吸水率 (再生粗骨材)

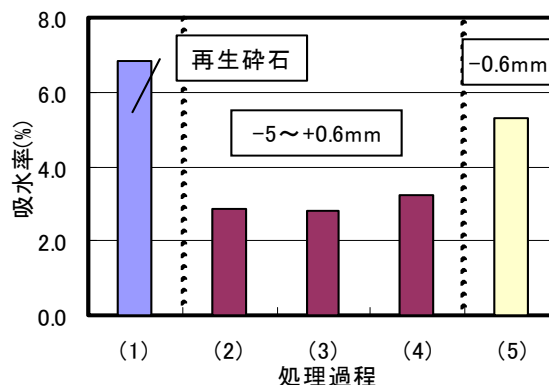


図 - 11 各フローでの吸水率 (再生細骨材)

表 - 2 試料の密度と吸水率

		絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
再生砕石		2.25	6.84
再生粗骨材	[a+b] 全体	2.62	1.93
	[a] +10mm(3)	2.66	1.75
	[b] -10 ~ +5mm(3)	2.59	2.07
再生細骨材	-5 ~ +0.6mm(3)	2.53	2.81
	-0.6mm(5)	2.39	5.32

下した。-5 ~ +0.6mm 試料の重比重産物(3)の吸水率の低下は僅かであった。

ジグ処理後の軽比重産物(4)と重比重産物(3)の吸水率は各試料共異なる。また、重比重産物は投入前試料(2)と比較し、吸水率が低下しており、ジグによる選別の効果が現れている。軽比重産物にはモルタル塊や木片等夾雑物の混入が見られたが、重比重産物にはほとんど認められない。ジグによる比重をしきい値とした選別は、粒径 0.6mm 以上の骨材全量に検査を行うことに等しく、骨材品質の確保、夾雑物等の混入防止に極めて有効であると考えられる。

粒径の小さな細骨材に当たる 4 インチハイドロサイクロンアンダーフロー産物(5)の吸水率試

験結果はJIS基準外であった。

得られた試料と再生砕石の密度及び吸水率を表 - 2 に示す。再生粗骨材及び粒径0.6mm以上の再生細骨材はJIS A 5308に規定される密度及び吸水率を満たした。

得られた再生骨材の粒度分布について図 - 12 及び図 - 13 に示す。本検討の範囲では、再生粗骨材、再生細骨材共にJIS A 5308 附属書に規定される砂利（最大寸法 25mm）及び砂の標準粒度範囲外であった。再生粗骨材が標準粒度を満たすには、+30mm 粒子を全量、-30 ~ +25mm 粒子を一部取り除き、-15 ~ +10mm 粒子を加えることで対応でき、再生細骨材が標準粒度を満たすには-2.5 ~ +0.3mm 粒子を加え、-0.3mm 粒子の一部を取り除くことで対応可能である。

アトリションミルによる剥離処理程度を変えることで、過粉碎を防止することも可能と考えられ、粒径0.3mm未満の細骨材量を減らすことは可能と考えられる。粒度分布に着目した運転条件の検討が課題となる。

得られた試料の質量構成比は、再生粗骨材に相当する+10mm 試料及び-10 ~ +5mm 試料の合計で約24%、再生細骨材に相当する-5 ~ +0.6mm 試料及び4 インチハイドロサイクロンアンダーフロ-産物の合計で約38%となった。

6. まとめ

湿式選別法を用い、再生骨材、再生微粉末を製造した結果、次のことが明らかになった。

- (1)アトリションミルのローター回転数、処理時間は再生骨材品質に影響を与えるが、飽和度により、その程度は異なる。再生細骨材品質は再生粗骨材の剥離過程で生じる未剥離粒子の影響により、明確な傾向は見られない。
- (2)再生微粉末の品質はミル条件に影響を受け、骨材片の含まれる割合が変化する。
- (3)実証プラントにて再生骨材を製造した結果、再生粗骨材、粒径0.6mm以上の再生細骨材では密度及び吸水率がJISの品質を満たすものを回収することができた。

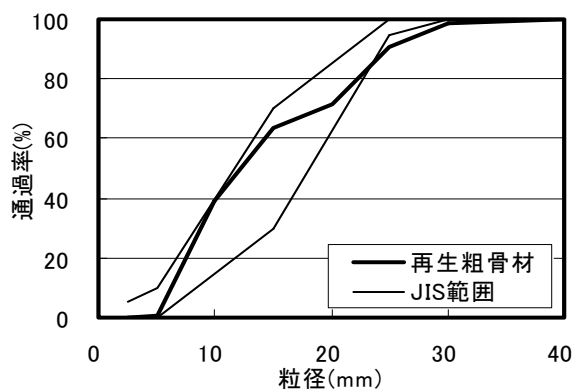


図 - 12 試料粒度分布（粗骨材相当）

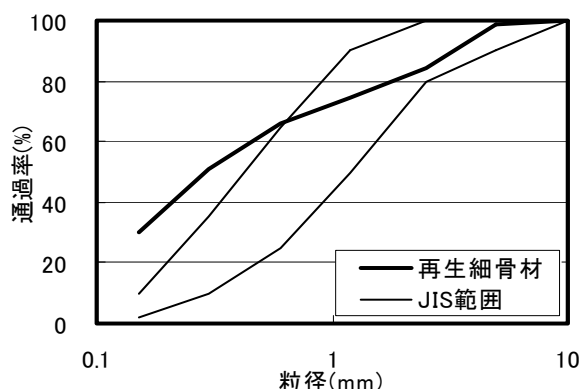


図 - 13 試料粒度分布（細骨材相当）

(4)比重をしきい値としたジグによる選別は、再生骨材品質の確保、夾雑物等の混入防止に極めて有効である。

参考文献

- 1)佐川孝広,平島 剛,松村 宇,若杉伸一:湿式選別法による再生微粉末のセメント原料化,コンクリート工学年次論文集,Vol.25, No.1, pp.1481-1486, 2003
- 2)松村 宇,伊藤正澄,平島 剛,桂 修:湿式選別法による高品質再生細骨材の製造,コンクリート工学年次論文集,Vol.25, No.1, pp.1475-1480, 2003
- 3)産業リサイクル事典編集委員会:産業リサイクル事典,産業調査会事典出版センター, 2000.1
- 4)田口玄一:第3版実験計画法 1976.12
- 5)資源・素材学会:資源・素材・環境技術用語集-和英・英和,日刊工業新聞社,1996.1
- 6)三輪茂雄:粉体工学通論,日刊工業新聞社,1981.2