

コンクリート塊から製造した再生骨材の諸特性

Properties of Recycled Aggregate Made of Demolished Concrete Debris

岩月 栄治[†], 森野 奎二[†], 上田 守宏[‡]

Eiji IWATSUKI, Keiji MORINO and Morihiko UEDA

Abstract : Demolished Concrete debris has been recycled mainly for roadbeds and backfill. Improvement of the quality is necessary in order to use the concrete debris as recycled aggregate for concrete. The basis of the improvement purpose is to remove mortar and cement paste that adhered to the rock aggregate. Improvement method in this study is based on abrasion and crushing action. For the equipment, Los Angeles Machine in JIS A 1121 and forced mixing type mixer in JIS A 8603 were used. In the raw material put into both testing equipment, 40mm recycled coarse aggregate used as a roadbed was used. Various impurities such as small amount of asphalt and fiber in the aggregate with large amount coarse debris were included in visual observation and under the microscope. At quality and energy consumption of improved recycled aggregate, there were differences between both testing equipments. For example, 3 time the time of Los Angeles machine was needed in the mixer in order to obtain the recycled aggregate of the quality of the same water absorption.

1. はじめに

コンクリート用骨材は、国内最大の消費材料である。一方、建設廃材に占めるコンクリート塊の発生量は平成7年度で約3,600万トンであり、建設廃棄物全体の約3分の1を占めている¹⁾。今後、循環型社会の構築と資源・環境保全の観点から、コンクリート塊をコンクリート用骨材として再利用するリサイクル技術の確立が必要である。

コンクリート塊をコンクリート用骨材として再利用する上で問題となるのは、吸水率や安定性²⁾であり、これらはコンクリートのワーカビリティや耐久性に大きく影響する。そのため、1994年には再生骨材の品質基準案³⁾が提案され、再生骨材の製造に関する規準となっている。

再生骨材の製造技術は、これまでの砕石を製造す

る破碎技術が応用されている。しかし、再生骨材の品質基準案に沿った再生骨材を製造するには、これまでの破碎技術の他に、さらに高品位な再生骨材に改善する技術を確立する必要があり、これについて数々の研究成果が発表されている^{4)~7)}。現在、品質改善の一般的な方法は、骨材に付着しているモルタルや脆弱な粒子を破碎・摩砕によって除去する方法である。しかし、この方法は設備の大型化や製造に伴う微粉末の発生など改善を必要とする点は少なくない。

本研究は、再生骨材を構成する骨材粒子の実体を詳細に把握するとともに、破碎や摩砕作用を加えることによって再生骨材の改善を行った。この品質改善を行った骨材の粒度構成や物理的性質を調べた。また、品質改善に伴って発生した微粉末を微視的に観察し、微粉末の特徴について検討した。

2. 実験方法

2.1 再生骨材の物理的性質と強度の推定

[†] 愛知工業大学工学部土木工学科 (豊田市)

[‡] 愛知工業大学大学院建設システム工学専攻

表 1 再生骨材の観察のために作製したポーラスコンクリートの配合

目標空隙率 (%)	水結合材比 (%)	単 位 量 (kg/m ³)					AE減水剤 (mL/m ³)
		水	セメント	高炉水砕スラグ粉末	再生粗骨材		
					5~10mm	10~15mm	
20~30	30	40~105	67~175	67~175	620~1178	302~755	533~1596

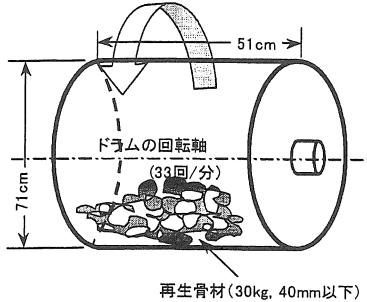


図 1 ロサンゼルス試験機による再生骨材の品質改善の概略

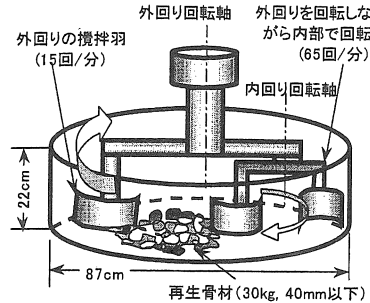


図 2 強制練りミキサによる再生骨材の品質改善の概略

表 2 再生骨材の密度及び吸水率

項 目	再生骨材		天然骨材(比較用)	
	細骨材	粗骨材 (Max40mm)	細骨材(川砂: 天竜川産)	粗骨材(砂岩碎石: 愛知県産, Max20mm)
表乾密度(g/cm ³)	2.22	2.36	2.64	2.76
絶乾密度(g/cm ³)	1.97	2.21	2.61	2.74
吸水率 (%)	12.75	6.81	1.24	0.73

表 3 再生骨材の品質基準(案)³⁾

項 目	再生粗骨材			再生細骨材	
	1種	2種	3種	1種	2種
吸水率(%)	3以下	3以下	5以下	7以下	5以下

実験に使用した再生骨材の性質を把握するため、物理試験として、密度・吸水率試験、形状の把握として、粒度試験、単位容積質量試験、粒径判定実積率試験を行った。骨材粒子の硬度や強度の推定には、JIS A 1121 のすり減り試験と BS812 の破碎試験を行った。また再生骨材と比較のために同時に天然骨材(細骨材: 川砂、粗骨材砂岩碎石)も試験を行った。

2.2 再生骨材のモルタル付着状況の観察

再生細骨材及び再生粗骨材をそのままの状態あるいは水洗いして目視観察および顕微鏡観察を行った。また、再生粗骨材(粒径 5~15mm)を用いて作製したポーラスコンクリート(形状: φ10×20cm)をダイヤモンドカッターで切断し、切断面の目視及び実体顕微鏡観察を行った。ポーラスコンクリートの配合の概略を表 1 に示す。

2.3 再生骨材の品質改善方法

再生骨材の品質改善には、ロサンゼルス試験機と強制練りミキサを用いた^{8), 9)}。この試験機の概要を図 1、図 2 に示す。ロサンゼルス試験機による改善は骨材粒の落下による衝突と骨材同士の摩擦により、

強制練りミキサはミキサの攪拌羽による破碎と骨材同士の摩擦によっている。両試験機に投入する試料は、路盤材用に製造された再生骨材を水洗いしながらフルイ分け、40mm~5mm として自然乾燥させたものを 30kg 使用した。改善時間は、5、10、15、30、45 分、1、2、3 時間とした。所定の改善時間後に試料を 0.15mm と 5mm のフルイで細骨材、粗骨材および微粉末にウエットスクリーニングした。その後、密度・吸水率試験および粒度試験を行った。また、品質改善時の使用エネルギーを検討するため電流・電圧の測定を行った。

2.4 品質改善によって発生した微粉末の観察

ロサンゼルス試験機によって発生した微粉末(0.15mm 以下)をウエットスクリーニング後に 40℃で乾燥し、X線回折、走査電子顕微鏡観察、X線マイクロアナライザー分析を行った。

3. 結果及び考察

3.1 実験に使用した再生骨材の性質

3.1.1 再生骨材の密度と吸水率

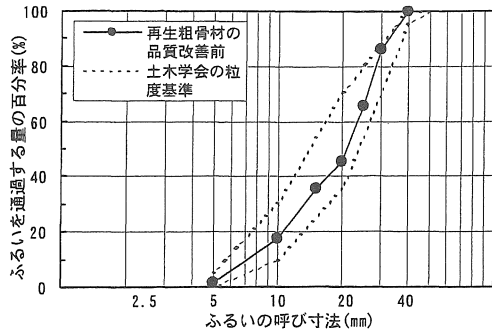


図3 再生粗骨材の粒度曲線

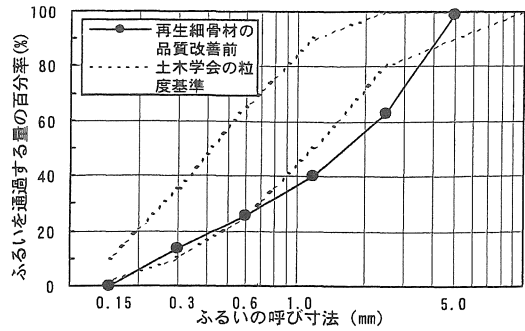


図4 再生細骨材の粒度曲線

表4 再生骨材の粗粒率、単位容積質量、実績率及び粒径判定実績率

項目	再生骨材		天然骨材(比較用)	
	細骨材	粗骨材 (Max40mm)	細骨材(川砂: 天竜川産)	粗骨材(砂岩碎石: 愛知県産、Max20mm)
粗粒率	3.45	7.36	2.56	6.89
単位容積質量(kg/l)	1.48	1.40	1.72	1.67
実績率(%)	72.2	63.3	66.0	60.8
粒径判定実績率(%)	66.8	57.2	63.6	58.1

表5 再生骨材のすりへり減量と破砕値

項目		再生粗骨材	天然骨材(比較用) 粗骨材(砂岩碎石)
すりへり減量(%)	粒度区分:A	31.7	15.0
	粒度区分:C	24.6	8.7
破砕値(%)		24.2	8.7

再生骨材の密度及び吸水率試験の結果を表2に示す。再生骨材の吸水率は、細骨材 12.75%、粗骨材 6.44%であり天然骨材と較べるとはるかに大きい。これは、モルタルが骨材に付着していたり、モルタル自体の塊が混入していることが原因となっている。再生骨材の品質基準案(表3)では、本研究で使用した再生骨材の区分は、粗骨材は3種、細骨材は2種以下となる。

3.1.2 再生骨材の粒度分布と形状

再生骨材の粒度曲線を図3(粗骨材)、図4(細骨材)に、再生骨材の粗粒率、単位容積質量、実績率及び粒径判定実績率を表4に示す。再生骨材全体の粒度構成は、粗骨材(5~40mm)は70.8%、細骨材(0.15~5mm)は25.7%、微粉末(0.15mm以下)は3.5%である。また、粗骨材の粒度曲線は土木学会の標準粒度の中央に分布しているが、細骨材は1.2mmと2.5mmのサイズが標準粒度範囲の下限以下となっている。粗粒率は表4に示すように粗骨材7.36%、細骨材3.45%であり、一般的な値(粗骨材6~8%、細骨材2.3~3.1%)と較べて細骨材は大きい。

実績率は、細骨材68.6%、粗骨材64.2%、粒径判定実績率は同順に66.8%と57.2%である。JIS A5005のコンクリート用砕石及び砕砂の粒径判定実績率の規準(砕砂53%以上、砕石55%以上)を上回っており、この再生骨材の粒形は良好である。

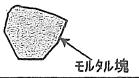

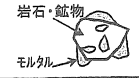
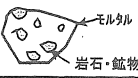

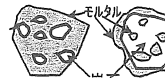



3.1.3 再生骨材の硬度と強度

再生骨材のすりへり減量と破砕値を表5に示す。再生粗骨材のすりへり減量は、粒度区分Aでは31.7%であり、粒度区分Cでは24.6%であった。天然骨材の砂岩碎石と較べると2.7~1.5倍である。コンクリート用砕石の規定値は40%以下であるため再生粗骨材は砕石としての品質は満たしているといえる。また、再生粗骨材の破砕値は24.2%であり、砂岩碎石は8.7%であることから、再生骨材の強度は砂岩碎石の1/3程度と低い。再生粗骨材のすりへり減量は、粒度区分Aで31.7%、区分Cで24.6%であり、コンクリート用砕石の基準値(一般コンクリート:40%以下)を満たしている。

3.2 再生骨材のセメントモルタル付着状況

再生骨材のモルタル付着状態の観察結果を表6に示す。再生骨材を構成している骨材粒を個別にみると表の概略図のように岩石粗骨材がまったく含まれていないモルタルのみからなる粒子から、モルタルの付着がなく普通骨材のような岩石・鉱物粒のみからなる粒子まで多様である。チャートのような平滑な表面を持つ骨材は後者の典型例である。また、このチャートのようなアルカリ反応性骨材も含まれることがあるので、個々の粒子の岩種も併せて把握することは重要である。その他、再生骨材にはアスフ

表 6 再生骨材のモルタル及びセメントペーストの付着状態

骨 材	← 多い 岩石・鉱物粒に付着したモルタル → 少ない					その他
	再生 細骨材					
再生 粗骨材						・断熱材用繊維 ・ガラス片

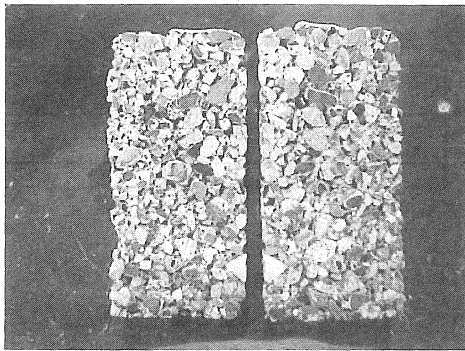


写真 1 再生粗骨材を用いたポーラスコンクリートの切断面の一例

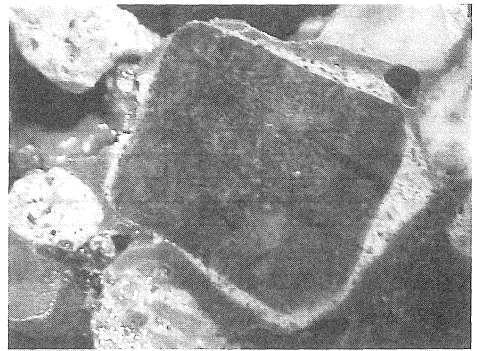


写真 2 チャート骨材の周囲に付着したモルタル (ポーラスコンクリートの切断面)

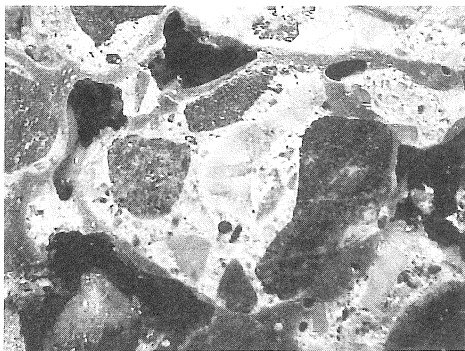


写真 3 モルタルと色々な骨材で構成されている再生粗骨材 (ポーラスコンクリートの切断面)

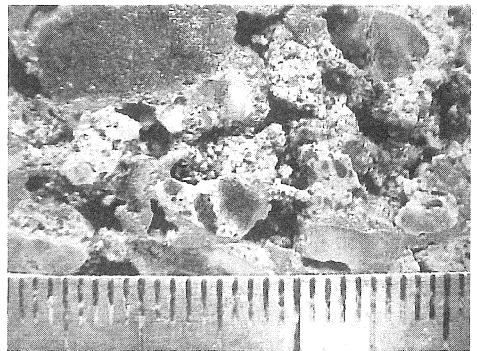


写真 4 ポーラスコンクリート作製時に破碎した再生粗骨材

ァルト塊、木片、レンガ片、断熱材用繊維類なども含まれていた。

再生粗骨材を用いたポーラスコンクリートの切断面の一例を写真 1 に示す。結合材として用いたペーストにはシリカフェームを混入しており、比較的黒褐色を呈しているため再生骨材に付着しているモルタルの判別が容易である。写真 2 はチャート骨材全体をモルタルが覆っている。写真 3 は粗骨材をほと

んど含まず、モルタルのみの粒である。また、写真 4 のようにポーラスコンクリート作製時の練混ぜによって破碎している粒もあり、脆弱な粒を含んでいることがわかる。

3.3 ロサンゼルス試験機を用いた再生骨材の品質改善

3.3.1 品質改善による骨材粒度構成の変化

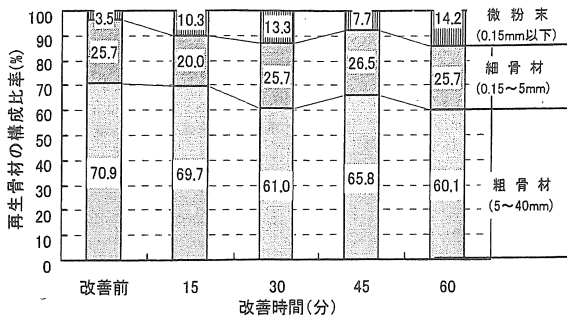


図5 ロサンゼルス試験機を用いて改善した再生骨材の粒度構成

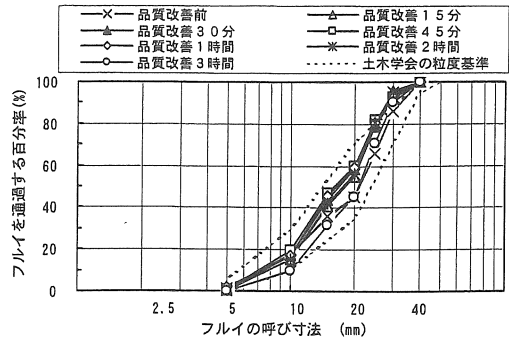


図6 ロサンゼルス試験機を用いて改善した再生粗骨材の粒度曲線

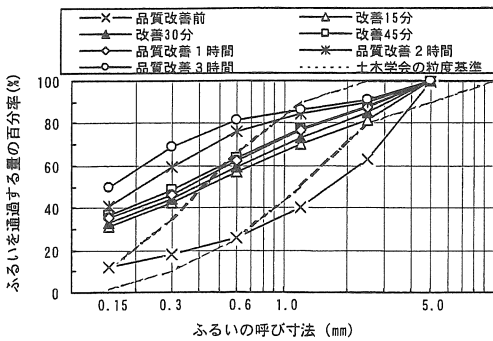


図7 ロサンゼルス試験機を用いて改善した再生細骨材の粒度曲線

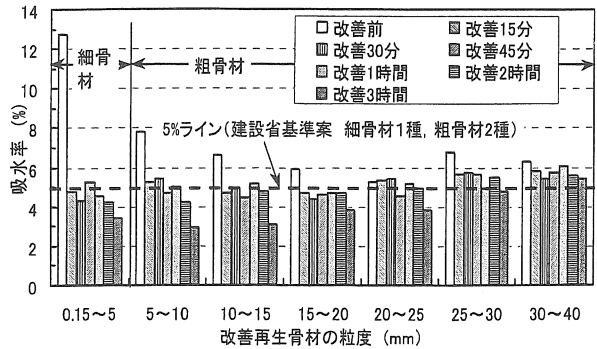


図8 ロサンゼルス試験機を用いて改善した再生骨材の吸水率

ロサンゼルス試験機によって改善した再生骨材の粒度構成を図5に示す。改善60分で再生粗骨材の占める割合は70.9%から60.1%に減少し、微粉末は3.5%から14.2%に増加した。しかし再生細骨材の占める割合(約26%)はほとんど変化しないという特徴がみられる。また、各改善時間毎の粗骨材、細骨材の粒度曲線を図6、図7に示す。粗骨材の粒度曲線は改善時間3時間においても変化はみられず、土木学会の標準粒度の範囲内である。細骨材は改善前には1.2mmと2.5mmのフルイに留まるサイズが下限以下であるが、改善15分で粒度曲線が全体に上昇し、0.15mm~0.6mmのフルイに留まる粒子が多くなる。ロサンゼルス試験機による改善では、粗骨材の一部の骨材粒子が破碎・摩砕されやすいということはないが、細骨材では細粒部分が増える傾向がある。

3.3.2 品質改善による吸水率の変化

ロサンゼルス試験機によって改善した再生骨材の吸水率の変化を図8に示す。細骨材の吸水率は改善15分で12.75%から4.68%に減少し8%の改善がみられ、

粗骨材では改善15分で粒径20~25mm以外の粒度で2.6~0.4%減少した。改善3時間の吸水率の減少に対する改善15分での減少率は、細骨材86%、粗骨材は粒径20~25mmを除いて56~49%であり、改善効果の大半が改善15分で現れている。また、細骨材の方が改善効果が大きく現れ、粗骨材でも粒径が小さいほど改善効果が認められる。細粒は粗粒によって衝撃・摩擦作用を受けるからであろうと思われる。

3.3.3 品質改善による単位容積質量の変化

ロサンゼルス試験機によって改善した再生骨材の単位容積質量の変化を図9に示す。粗骨材、細骨材とも改善時間の増加に伴って単位容積質量が増加しており、粗骨材は改善前1.40kg/lから改善15分で1.43kg/l、同様に細骨材は1.48kg/lから1.57kg/lであり細骨材の方が改善効果大きい。これは、前述の吸水率と同様の結果となっている。

3.4 強制練りミキサを用いた再生骨材の品質改善

3.4.1 強制練りミキサによる吸水率の改善

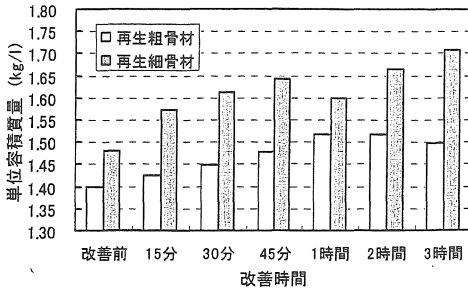


図 9 ロサンゼルス試験機を用いて改善した再生骨材の単位容積質量

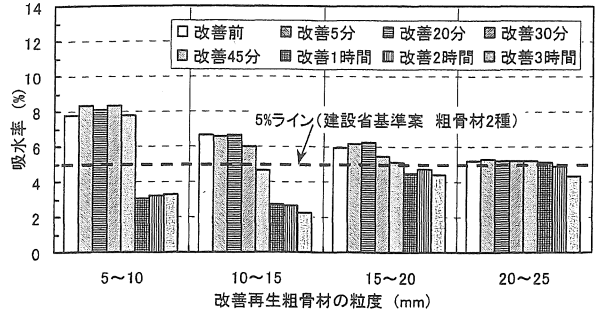


図 10 強制練りミキサを用いて改善した再生粗骨材の吸水率

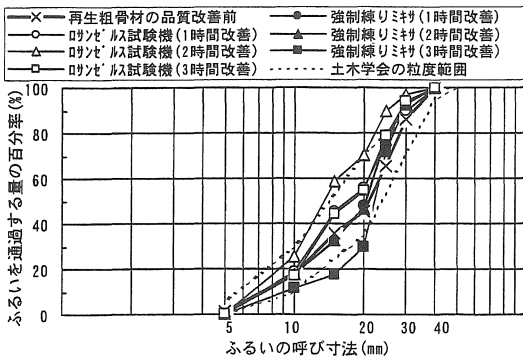


図 11 ロサンゼルス試験機と強制練りミキサを用いて改善した再生粗骨材の粒度曲線の比較

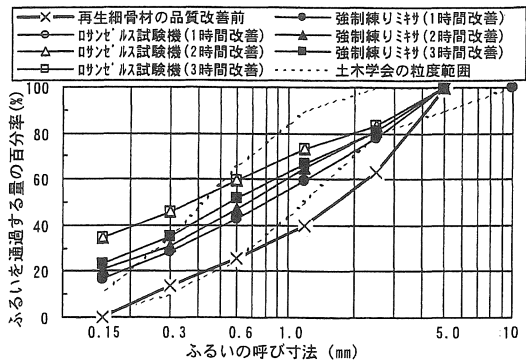


図 12 ロサンゼルス試験機と強制練りミキサを用いて改善した再生細骨材の粒度曲線の比較

強制練りミキサを用いて改善した再生粗骨材の吸水率を図 10 に示す。粒径 5~10mm の吸水率は改善 45 分まで減少しないが、1 時間後では 7.79~3.03% に減少している。粒径 10~15mm でも同様に 1 時間後の減少が著しい。前述のロサンゼルス試験機の結果では改善 15 分で粗骨材の吸水率は 5%以下(建設省案 2 種骨材)となるが、強制練りミキサでは同程度にするのに 45 分~1 時間の改善時間が必要である。これは、摩砕・破碎方法に違いが影響していると思われる。

3.4.2 ロサンゼルス試験機及び強制練りミキサにより改善した骨材の粒度

ロサンゼルス試験機と強制練りミキサを用いた品質改善による粒度曲線の比較を、図 11(粗骨材)及び図 12(細骨材)に示す。ここでは、両者での比較を明瞭にするため 1~3 時間の結果を示した。粗骨材は、どちらの改善方法でもほぼ土木学会の粒度範囲付近であるが、ロサンゼルス試験機では 15mm のフルイに

留まるサイズが増加する傾向があり、強制練りミキサは 15mm と 20mm のサイズが減少している。また、細骨材はロサンゼルス試験機の方が全体に細かい粒度が増える傾向がある。品質改善方法による骨材の破碎・摩砕の差が影響していると思われる。

3.4.3 ロサンゼルス試験機及び強制練りミキサの品質改善の消費エネルギー

ロサンゼルス試験機及び強制練りミキサを用いた品質改善時の電流測定結果を図 13 に示す。測定にはクランプメータを使用した。両改善方法とも起動時には電流が高いが 1 分以後は安定している。5 分後の電流・電圧は、ロサンゼルス試験機は 2.0A(電圧 205V)、強制練りミキサは 3.9A(207V)である。各改善方法の仕事率と再生骨材の吸水率の改善効果に対する消費エネルギーを表 7 に示す。仕事率(W=V×A)はロサンゼルス試験機で 410W、強制練りミキサで 807W である。図 10 (前出) から強制練りミキサの吸水率の改善効果は、粒径 5~10mm では 1 時間から改

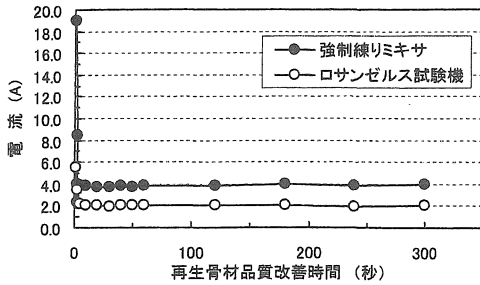


図 13 ロサンゼルス試験機及び強制練りミキサを用いた品質改善時の電流の測定結果

表 7 ロサンゼルス試験機及び強制練りミキサの品質改善に使用するエネルギーの比較

改善方法	電流 (A)	電圧 (V)	仕事率 (W)	試料1kgに対する1時間の仕事量 (J/kg)	1時間での吸水率の改善率 (%)	試料1kgに対する1時間の仕事量 / 吸水率の改善率 (J/kg/%)
ロサンゼルス試験機	2.0	205	401	4.93×10^4	35.9	1.37×10^3
強制練りミキサ	3.9	207	807	9.70×10^4	57.6	1.68×10^3

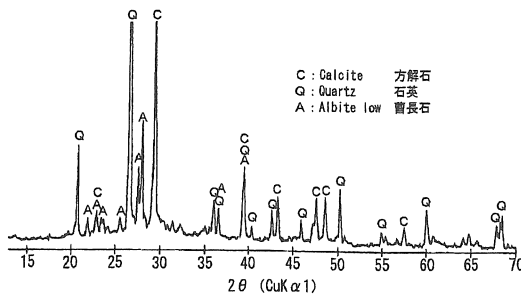


図 14 微粉末の X線回折結果

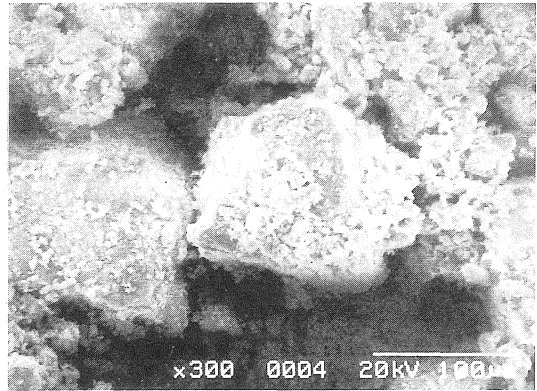


写真 5 微粉末の走査電子顕微鏡写真

善効果がみられているので両方法とも粒度 5~10mm、改善 1 時間で消費エネルギーの比較を行う。改善 1 時間での試料 1kg に対する仕事量 (W×s) / 30) は、ロサンゼルス試験機は 4.93×10^4 J/kg、強制練りミキサは 9.70×10^4 J/kg である。このときの改善 1 時間における吸水率の改善率は、同順で 35.9%、57.6% である。これらから、吸水率の改善率に対する消費エネルギーは量 (1 時間の仕事量 J/kg / 1 時間での吸水率の改善率%) は、ロサンゼルス試験機は 1.37×10^3 J/kg/%、強制練りミキサは 1.68×10^3 J/kg/% であり、ロサンゼルス試験機は強制練りミキサよりも少ないエネルギーで吸水率を改善することができる。

3.5 品質改善時に発生した微粉末の微細構造

ロサンゼルス試験機を用いて 1 時間改善したときの微粉末の X線回折結果を図 14 に示す。回折ピークから、炭酸カルシウム、石英、長石が確認され、セメント鉱物や水酸化カルシウムはみられなかった。再生骨材に使用されているセメントはほとんど水合しており、水酸化カルシウムは炭酸化した。こ

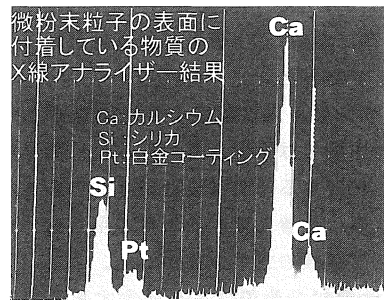


図 15 微粉末の表面に付着している微粒子の X線マイクロアナライザー結果

のことは、分析に使用した骨材が水洗いされた骨材であり、また破碎後長期間保存されていたものであったからである。

微粉末の走査電子顕微鏡写真を写真 10 に示す。200µm 程度の角張った粒子が多くみられ、表面には微細な粒子が付着している。この微細な粒子は X線マイクロアナライザー分析 (図 15) では Ca であった。これらから再生骨材の微粉末は、微細な岩石粒子にセメントモルタルの粒子が付着した状態である。

4. 結 論

本研究は、再生骨材の特徴の把握と、ロサンゼルス試験機及び強制練りミキサを用いて品質改善を行ったものである。品質改善では吸水率や粒度の変化、改善に要する時間や消費エネルギーについて検討した。結果をまとめると以下のようである。

- (1) 再生骨材は多種多様な骨材粒子からなり、コンクリート塊以外にもアスファルト片、レンガ片、木片、断熱材繊維片等が混入していた。
- (2) 再生粗骨材の吸水率は 6.81%、絶乾比重は $2.21\text{g}/\text{cm}^3$ であり、細骨材は同順で 12.75%、 $1.97\text{g}/\text{cm}^3$ であった。また、再生粗骨材のすりへり減量は、天然骨材（砂岩碎石）と較べると 2.7～1.5 倍であり、破砕値は 1/3 程度であった。
- (3) 品質改善による吸水率の改善は、ロサンゼルス試験では 15 分で粗骨材（粒径 5～10mm）は 7.80% から 5.22% に、細骨材は 12.75% から 4.75% に改善された。また強制練りミキサでは、1 時間で粗骨材は 7.99% から 3.03% に改善されており、両方法ともその効果が認められる。
- (4) ロサンゼルス試験機を用いた再生骨材の品質改善による粒度構成は、改善 1 時間で粗骨材は 70.9% から 60.1% に減少し、微粉末は 3.5% から 14.7% に増加した。細骨材は増減がみられずほぼ一定であった。
- (5) ロサンゼルス試験機と強制練りミキサによる改善方法では両者に差がみられ、同品質にするために要する時間は後者が 3 倍であった。また、吸水率の改善に要するエネルギーも、ロサンゼルス試験機の方が少なかった。
- (6) 再生骨材の改善により発生する微粉末の SEM 観察では、岩石・鉱物粒の表面にセメント水和物が付着した状態であった。X線回折では水和セメント鉱物や水酸化カルシウムは検出されず、炭酸カルシウムのみであった。これは分析に使用した試料が水洗いされた骨材であり、また破砕後長期間保存されていたものであったからである。

謝 辞

本論文の大部分のデータは、本学土木工学科 4 年生の磯村保司、市川浩次、大谷和久、蟹江次郎、木村由香、白山靖洋君らの卒業研究結果によっている。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 兼氏康博：法令と施策について，日本コンクリート工学協会中部支部，シンポジウムコンクリートの未来とリサイクル—廃棄物問題を考える—，pp.4-10,1999
- 2) 吉兼 亨：コンクリート系産業廃棄物（土木分野）の減量化とリサイクル，日本コンクリート工学協会中部支部，シンポジウム コンクリートの未来とリサイクル—廃棄物問題を考える—，pp.19-31,1999
- 3) 建設省技調発第 88 号建設大臣官房技術調査室長通達：コンクリート副産物の再利用に関する用途別暫定品質基準(案)，1994
- 4) 山田 優，川本裕章，長谷川俊和，本多淳裕：コンクリートがらからの骨材回収に関する研究，資源・素材学会，建設用原材料，Vol.3，No.1，pp.16-20,1993
- 5) 長岡茂徳：再生骨材製造装置，コンクリート工学，Vol.35，No.7，pp.61-64,1997
- 6) 山田 優：コンクリート・リサイクルについて—その技術の現状と課題—，骨材資源，No.113，pp.1-8,1997
- 7) 石倉 武，最首貞典，助清満昭，友澤史紀：高品質再生骨材製造技術の開発，コンクリート工学，Vol.37，No.7，pp.16-23,1999
- 8) 鍵本広之，佐藤道生：再生骨材の回収に関する基礎試験，土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集第 V 部，pp.440-441,1998
- 9) 森野奎二，岩月栄治：再生骨材のコンクリートへの適応のための品質改善，資源・素材学会，建設用原材料，Vol.9，No.1，pp.26-33,1999

(受理 平成12年3月18日)