

論文 異なる破碎方法により製造された再生骨材の物性に関する検討

佐川 康貴*1・松下 博通*2・鶴田 浩章*3・陶 佳宏*4

要旨：本研究では、破碎方法の違いが再生骨材の品質に与える影響を調べるため、同一のコンクリート部材から異なる破碎方法で再生骨材を製造し、細、粗骨材および微粒分の構成割合や骨材の物理的性質について検討した。その結果、インパクトクラッシャーとコーンクラッシャーで製造した骨材は品質はほぼ同じであるが、インパクトクラッシャーの方が細骨材の製造割合が多くなる、ジョークラッシャーでは骨材が角張り、粗骨材が多く製造される、加熱すりもみ法では高品質の骨材が得られるが、多量の微粒分が発生する等の知見を得た。

キーワード：コンクリート塊、再生骨材、破碎方法、モルタル付着率、加熱すりもみ

1. はじめに

現在、骨材資源の枯渇化や最終処分場の容量限界などの問題から、コンクリート塊を再利用することが必要とされている。国土交通省により公表された平成 12 年度のコンクリート塊の再利用率は 96 % と高い値を示している¹⁾が、大部分が下層路盤材としての利用にとどまっているのが現状である。

平成 12 年に施行された循環型社会形成推進基本法では、形成すべき「循環型社会」の姿を明確に提示している。その中で、廃棄物等のうち有用なものを「循環資源」と定義し、循環資源の適正な利用及び処分の優先順位を(1)発生抑制、(2)再使用、(3)再生利用、(4)熱回収、(5)適正処分の順とすると明示している。現在、社会資本として大量に蓄積されているコンクリート構造物は補修、補強等により耐用年数を伸ばすことにより一時的に発生を抑制することはできるが、いずれは寿命を迎え解体されるため、コンクリート塊の発生抑制は困難となることが考えられる。また、再使用の方法として、解体したコンクリート塊をプレキャスト部材として PC 鋼材で連結し、新たな構造物や部材とし

て使用することが考えられるが、多量のコンクリート塊を再使用することは困難である。よって現段階では、コンクリート塊はコンクリート用材料として再生利用するのが有効であると言える。

現在までの再生骨材に関する技術開発の流れは以下の 3 つに大別できる。

- (1) 加熱すりもみ法²⁾等による高品質な再生骨材を回収するもの。ただし、回収する際のコスト、使用エネルギーは大きくなるとともに、多くの微粒分を生じる。
- (2) 再生骨材を高い品質の要求されない構造物、部位に限定して用いるもの。これは平成 12 年に策定された TR A 0006「再生骨材を用いたコンクリート」³⁾に代表される。
- (3) 膨張材や高性能 AE 減水剤の使用等、配合の見直しにより、再生骨材のコンクリート用骨材としての用途を広げるもの。TR A 0006 では標準品は呼び強度 12 の再生コンクリートに限定されているが、高品質のコンクリートも製造可能であると考えられる。

*1 九州大学大学院助手 工学研究院建設デザイン部門 修士(工学) (正会員)

*2 九州大学大学院教授 工学研究院建設デザイン部門 工博 (正会員)

*3 九州大学大学院助教授 工学研究院建設デザイン部門 博士(工学) (正会員)

*4 九州大学大学院助手 工学研究院建設デザイン部門 (正会員)

現在、再生骨材を製造する際には、まずジョークラッシャにより一次破碎を行い、次いでインパクトクラッシャ、コーンクラッシャ等を用いて二次破碎を行うという一連の方法が一般的に行われているが、循環型社会の構築のためには、再生骨材の適用部位や要求品質に応じ、再生骨材の製造に伴うコストや電力使用量、二酸化炭素排出量、微粒分の発生量を考慮し、適切な破碎方法、製造方法あるいは処理方法を選定することが望ましいと考えられる。そこで本研究では、同一コンクリート部材から異なる破碎方法により再生骨材を製造し、粒度分布、密度、吸水率、実積率、破碎値 (British Standard BS812) およびモルタル付着率を求め、破碎方法の違いが再生骨材の品質に与える影響について検討を行った。

また、破碎方法を変化させる以外に、高品質の再生骨材が回収可能な加熱すりもみ法により再生骨材を製造し、各物性値および破碎物中の再生粗骨材、再生細骨材、微粒分の割合を比較した。さらに、破碎物中の微粒分を減少させるとともに再生骨材の粒形改善を図るために再生骨材をセメントペーストによって処理した骨材についても検討を行った。

なお、今後、RC 部材に加えて PC 部材も発生量が増加すると予想されるため、本研究では、PC 部材で一般的に使用される圧縮強度 40N/mm^2 程度の比較的高強度のコンクリートを原コンクリートとして使用した。

2. 実験概要

2.1 原コンクリートの材料特性

本研究では、再生骨材を製造するための原コンクリートは PC 版とした。原コンクリートの使用材料および物性値は、表-1 に示す通りである。粗骨材の最大寸法は 20mm であり、コンクリートの配合は目標スランプが $6.5 \pm 1.5\text{cm}$ 、目標空気量が $4.5 \pm 1.5\%$ となるように定めたもので、表-2 に示す通りである。破碎時の原コンクリートの材齢は約 6 ヶ月で、原コ

表-1 原コンクリートの使用材料および物性値

セメント	早強ポルトランドセメント (密度 3.14g/cm^3)
細骨材	福岡県筑後川産 川砂 (表乾密度 2.53g/cm^3 , 吸水率 2.5%, 粗粒率 3.11)
粗骨材	福岡県甘木産 砕石 (表乾密度 2.93g/cm^3 , 吸水率 0.6%, 粗粒率 6.80)
混和剤	ポリカルボン酸エーテル系 高性能 AE 減水剤

表-2 原コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m^3)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
41	41.0	171	420	674	1124	2.52

表-3 コア供試体の圧縮強度および弾性係数

供試体番号	圧縮強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)
1	41.3	30.3
2	40.2	30.7
3	45.2	30.4
平均	42.2	30.5

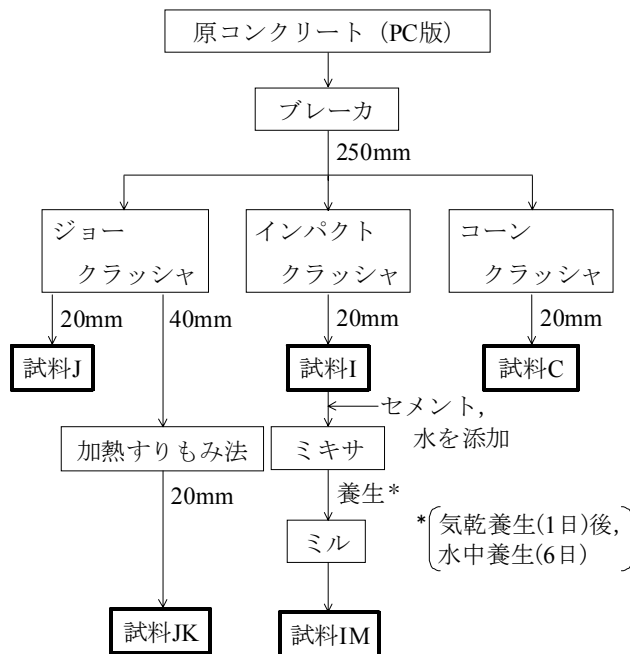


図-1 再生骨材の製造フロー

ンクリートから採取した $\phi 10 \times 20\text{cm}$ コア供試体より求めた圧縮強度および弾性係数はそれぞれ、 42.2N/mm^2 、 30.5kN/mm^2 であった (表-3)。

2.2 再生骨材の製造方法

まず、原コンクリートを大型のブレーカにより一辺が 250mm 以下になるように破碎し、鋼材を取り除いた。その後、破碎および処理方法を変化させて、骨材の最大寸法が 20mm 程度の再生骨材を 5 種類製造した（図-1）。ブレーカによる破碎以降の製造過程について以下に示す。なお、試料 J の製造には試験室用の小型の装置を使用し、試料 I、試料 C の製造には再資源化施設内の装置を使用した。

試料 J は、ジョークラッシャ（開口幅約 20mm）を 1 回通過させたもの全量を試料としたものである。ジョークラッシャは 2 枚の歯板の往復動により圧縮破碎するものである⁴⁾。

試料 I は、インパクトクラッシャ（周速約 40m/s）を 1 回通過させたもの全量を試料としたものである。インパクトクラッシャはローターを高速回転させて原料を打撃し、衝撃を与え、破碎するものである⁴⁾。

試料 C は、コーンクラッシャを 1 回通過させたもの全量を試料としたものである。コーンクラッシャは、円錐状のマントルに偏心運動を与え、衝撃を伴う圧縮により破碎するものである⁴⁾。

試料 JK は、加熱すりもみ法により製造した試料である。まず、あらかじめジョークラッシャを 1 回通過させ、最大寸法を 40mm 程度としたものを 300℃まで加熱し、セメントペーストを脆弱化させる。その後、チューブミルを通し、骨材同士のすりもみ作用により骨材に付着しているモルタルおよびセメントペーストをはがし、粗骨材、細骨材を回収する。また、ミル内では通風を行っており、集塵機により微粒分が別途回収される。本研究では、別途回収された微粒分以外の骨材を試料とした。

試料 IM は、セメントペーストにより再生骨材表面の凹凸を埋めることで粒形を改善し、微粒分の量を減少させることを目的として製造した試料である。まず、可傾式ミキサ内にインパクトクラッシャで破碎して得られた骨材である

表-4 骨材の試験項目及び試験方法

試験項目	試験方法
ふるい分け	JIS A 1102
単位容積質量及び実積率	JIS A 1104
細骨材密度及び吸水率	JIS A 1109
粗骨材密度及び吸水率	JIS A 1110
400kN 破碎値	BS 812 Part 110
モルタル付着率	塩酸に浸漬、水洗いし、乾燥後に質量測定。5mmふるい残分より、5mmふるいを通すものの比率を算出。
ペースト付着率	塩酸に浸漬、水洗いし、乾燥後に質量測定。0.075mmふるい残分より、0.075mmふるいを通すものの比率を算出。

試料 I と、セメント（骨材の 10%（質量比））とをミキサ内に投入し、混合した後、水（骨材の 5%（質量比））を徐々に添加し、5 分間ミキサを回転させる。その後、24 時間気中養生、6 日間水中養生を行う。このままの状態では骨材はセメントペーストにより粒子同士が付着しているうえ、微粒分がほとんど骨材表面に付着しているため、ミルで摩砕加工を行い、コンクリート用骨材として使用可能な状態としたものを試料とした。

2.3 試験項目

表-4 に試験項目および試験方法を示す。なお、密度、吸水率、単位容積質量および実積率については、破碎方法の違いによる骨材の粒形への影響を調べるため、各粒度範囲ごとにふるい分けた試料についても試験を行った。さらに、JIS で規定されている骨材試験に加え、British Standard BS 812 に規定されている 400kN 破碎値（以下、「破碎値」と記す）も測定した。なお、5mm 以下の骨材に対する表乾状態は、手で握り締めたときの表面の濡れ具合等から判断した。

さらに、各製造方法により製造した試料の構成割合を求めるため、各粒度範囲毎にふるい分けた試料約 500g を 7 倍希釈の塩酸（約 5%）

に浸漬し、1日1回以上の割合で攪拌および溶液の交換を行い、浸漬開始から5日後に水で洗い流し、炉乾燥させた後に試料の質量を測定し、浸漬前の質量に対する塩酸に溶解した質量の比率を求めた。

粗骨材（5mm以上の骨材）については、水洗い時に呼び寸法5mmおよび0.075mmのふるいを通過させた。5mmのふるいを通過したものとの比率を、その粒度範囲における「モルタル付着率」とし、0.075mmのふるいを通過したものとの比率を「ペースト付着率」とした。一方、細骨材（0.075～5mmの骨材）については、水洗い時に呼び寸法0.075mmのふるいを通過させ、ふるいを通過したものとの比率を、その粒度範囲における「ペースト付着率」とした。

3. 試料の構成割合

表-5に、試料中の微粒分、再生細骨材、再生粗骨材の構成割合を示す。また、モルタル付着率、ペースト付着率の試験結果より、再生細骨材中のペースト分と再生粗骨材中のモルタル分およびペースト分を求めた結果を図-2に示す。ここでは、呼び寸法5mmのふるいに留まるものを再生粗骨材、呼び寸法0.075mmのふるいを通過するものを微粒分とした。なお、試料JKについては骨材製造時に集塵機で回収されたものを微粒分とした。

試料J、試料I、試料C、試料IMの微粒分量は少なく、高い骨材回収率が得られた。一方、試料JKは微粒分が39.0%と高く、他の試料に

比べて骨材回収率は低くなった。これは、加熱すりもみ法では製造時に加熱処理によりセメントペースト部分を脆弱化させて骨材を回収しており、このセメントペースト部分が微粒分の主な起源となっているからである。

4. 粒度分布

図-3に再生細骨材および再生粗骨材の粒度

表-5 破碎した試料の構成割合

試料名	微粒分 (%)	再生細骨材 (%)	再生粗骨材 (%)
試料J	1.3	27.2	71.5
試料I	1.9	48.3	49.8
試料C	1.4	34.1	64.5
試料JK	39.0	26.8	34.2
試料IM	1.4	56.3	42.3

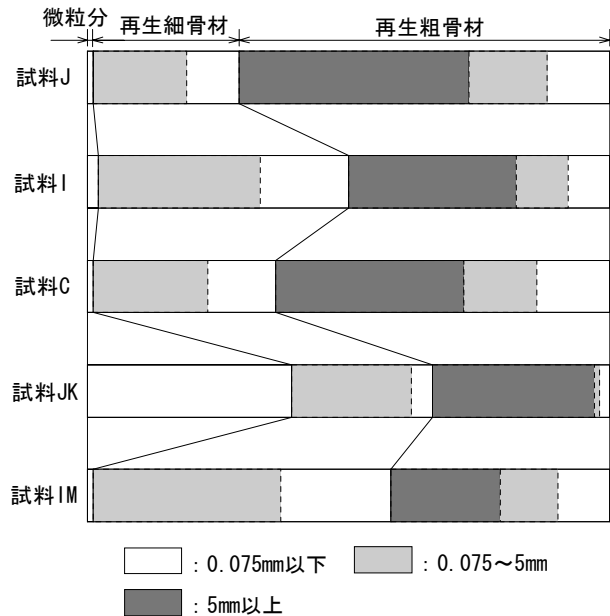


図-2 ペースト付着率より求めた試料の構成割合

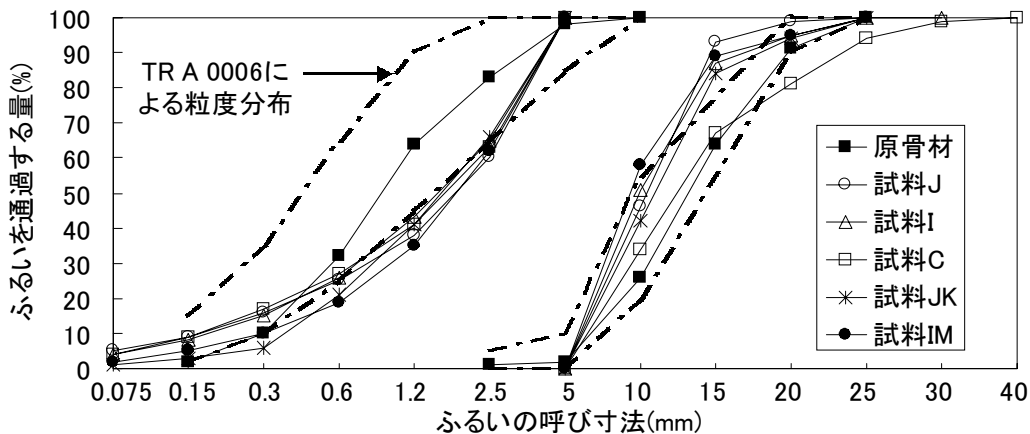


図-3 粒度曲線

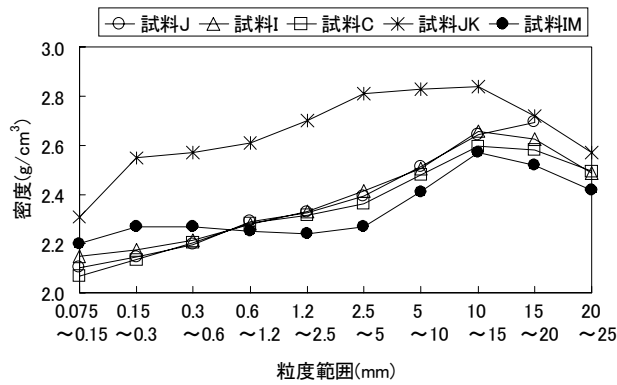


図-4 密度試験結果

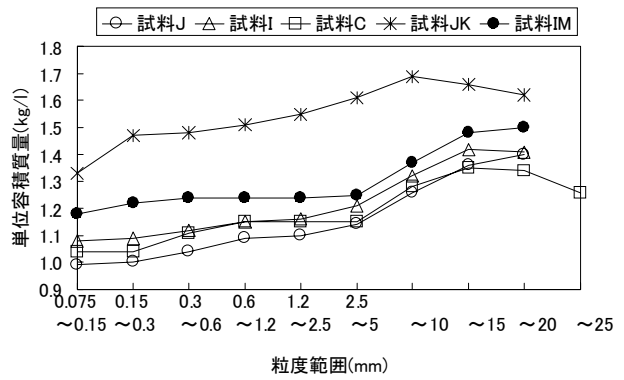


図-7 単位容積質量試験結果

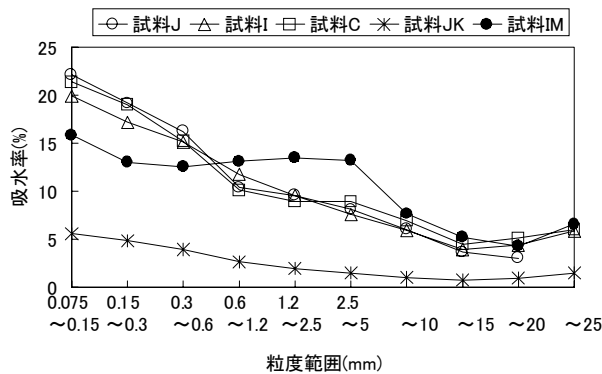


図-5 吸水率試験結果

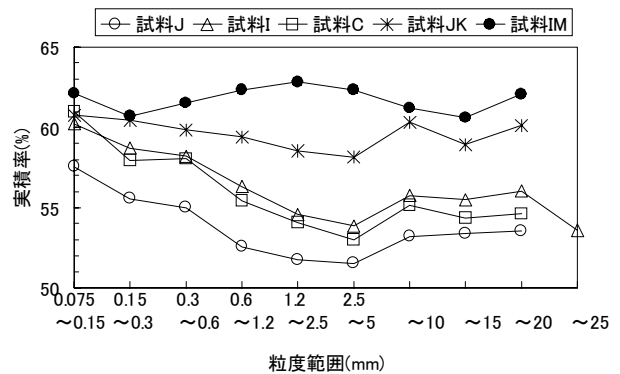


図-8 実積率試験結果

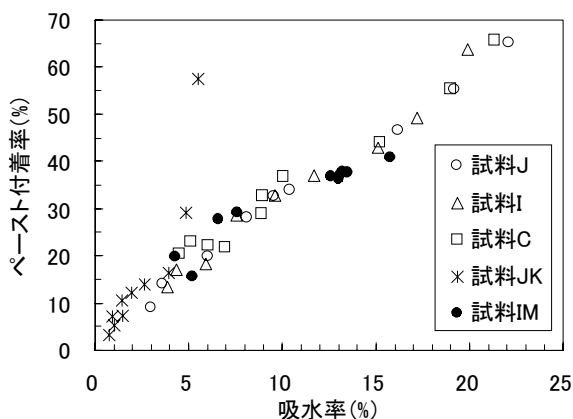


図-6 吸水率とペースト付着率との関係

曲線を示す。図中には原コンクリートに使用した骨材の粒度分布およびTR A 0006に示される再生骨材の粒度範囲も併せて示している。

まず再生細骨材についてであるが、試料 J、試料 I および試料 C はほぼ同様の粒度曲線となっている。試料 JK では 0.3mm 以下の割合が少なくなっている。これは高品質の細骨材を得るために微粒分を別途回収していることによるものであると考えられる。

一方、再生粗骨材についてであるが、最大寸

法が 20mm となるよう破碎装置の調整を行ったものの、試料により最大寸法が異なる結果となった。ジョークラッシャにより破碎した試料 J は 15mm 以上の骨材が少なく、最大寸法が 15mm となり、コーンクラッシャにより破碎した試料 C は最大寸法が 25mm となっている。

試料 IM は 5mm 以上の範囲では 5 ~ 10mm の部分が他の試料に比べて多くなっており、また、5mm 以下の範囲では他の試料に比べて粒度が荒くなっており、骨材全体としての粒度範囲は他の試料よりも狭くなっている。

5. 再生粗骨材および再生細骨材の品質

5.1 密度および吸水率試験結果

各粒度範囲ごとの密度および吸水率をそれぞれ図-4、図-5に示す。試料 JK は全粒度範囲にわたり他の試料に比べて密度が高く、また、吸水率が低く、高品質な骨材が得られていることが分かる。試料 J、試料 I、試料 C は密度、吸水率がほぼ等しい結果が得られ、破碎方法の

違いによる影響は見られなかった。また、試料 IM は試料 J, 試料 I, 試料 C とほぼ同等の結果が得られた。

図-6 に吸水率とペースト付着率との関係を示す。吸水率とペースト付着率との間に高い相関関係があることが分かる。試料 JK の一部にペースト付着率が高いにもかかわらず、吸水率が小さいものが見られるが、本研究の範囲内ではその原因を特定することはできない。

5.2 単位容積質量および実積率試験結果

各粒度範囲ごとの単位容積質量試験および実積率試験の結果をそれぞれ図-7, 図-8 に示す。図-8 より、試料 IM の実積率が最も高く、すべての粒度範囲において 60% を超えており、粒形が丸みを帯びていることが分かる。次いで試料 JK が高く、試料 I と試料 C はほぼ等しく、試料 J が最も低く、粒形が角張っていると言える。

5.3 破砕値試験結果

表-6 に各試料の破砕値試験結果を示す。試料 JK を除き、破砕値はほぼ等しく、破砕方法の違いによる破砕値への影響は見られなかった。また、破砕値試験は 10 ~ 15mm の試料を用いて試験を行うが、吸水率の値との間にも明確な関係は認められなかった。試料 JK の破砕値は他の試料に比べて小さく、高品質な骨材が得られたと言える。

表-6 破砕値試験結果

試料名	試料J	試料I	試料C	試料JK	試料IM
破砕値(%)	20	19	20	12	19

6. まとめ

本研究では破砕方法の違いが再生骨材の品質に与える影響について検討を行った。ジョークラッシュャ、インパクトクラッシュャ、コーンクラッシュャを用いて1度の破砕工程で最大寸法が 20mm 程度となるように製造した再生骨材、加熱すりもみ法により製造した再生骨材、およびセメントペーストにより処理を行った再生骨材

を用いた検討より得られた結果を以下に示す。

- (1) コーンクラッシュャにより得られた再生骨材とインパクトクラッシュャにより得られた再生骨材は密度、吸水率および実積率がほぼ等しく、ほぼ同等の品質の再生骨材が得られた。しかしながら、インパクトクラッシュャの方が再生細骨材の割合が多くなった。
- (2) ジョークラッシュャにより得られた再生骨材は実積率が低く、粒形が角張った骨材となった。ジョークラッシュャでは再生細骨材よりも再生粗骨材の方が多く得られた。
- (3) 加熱すりもみ法により得られた再生骨材は他の破砕方法により得られた骨材に対して高品質な骨材が得られた。しかしながら、微粒分が 40%程度と非常に多く発生するため、この方法を使用する場合には微粒分の処理方法の検討を行う必要がある。
- (4) インパクトクラッシュャにより得られた細骨材にセメントと水を加えて加工をした場合、実積率が大きくなり、粒形が丸みを帯びた骨材が得られた。

なお、本研究は、文部科学省科学研究費補助金・基盤研究 A(1) (代表者 松下博通, No.11305032) の一環として行われた。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 12 年度建設副産物実態調査結果について、http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha01/01/011225_.html, 2001.12
- 2) 島裕和, 鴻巣一巳, 橋本光一, 古賀康男：加熱すりもみ法によるコンクリート塊からの高品質骨材回収技術の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.1093-1098, 2000.6
- 3) コンクリートへのリサイクル資源活用技術の標準化に関する調査研究委員会：再生骨材を用いたコンクリートの TR の概要, コンクリート工学, Vol.39, No.11, pp.53-59 2001.11
- 4) 長岡茂徳：骨材製造機械の現状, コンクリート工学, Vol.34, No.7, pp.115-121, 1996.7