

論文 高速回転するチェーンの打撃エネルギーを用いたコンクリート廃棄物の骨材再生法の開発

芋坂 和代^{*1}・竹下 治之^{*2}・市川 栄徳^{*3}・松原 三郎^{*4}

要旨：本研究は、コンクリート廃棄物の骨材再生法の開発に関するもので、高速回転するチェーンの打撃エネルギーにより、コンクリート塊の破碎と骨材周辺のモルタル分および角張り部の除去を行う、新しく考案した骨材再生法の実験的研究結果について述べたものである。本研究では、主に実用化を図る場合に関係する要因が、再生骨材の品質に及ぼす影響について検討した。その結果、製造要因を適切に選ぶことで、粗骨材では元建設省が通達している品質基準1種の優れた粒形の再生骨材を製造できることが明らかとなった。

キーワード：コンクリート廃棄物、リサイクル、骨材、品質、粒形、粒度

1. まえがき

コンクリートの寿命は70～80年、社会的な寿命は35～45年と言われている。このことから、今後、高度成長期に建設された多くのコンクリート構造物が老朽化して順次解体され、コンクリート廃棄物が大量発生することが予想される。現在、コンクリート廃棄物は主に路盤材、裏込材などに利用されているが、このような再利用だけでは処理できる量に限界がある。

一方、近年、環境への影響から川砂利などの天然骨材の入手も難しくなりつつあり、しかも、その代替骨材としての砕石用の骨材資源も年々減少している。また、細骨材としての海砂の採取も禁止になることが明らかとなっている現在、これらの骨材に替わる新しい骨材資源の開拓が必要不可欠となっている。このような現状から、今後、大量発生するであろうコンクリート廃棄物から骨材を回収し、コンクリート用骨材として再利用する技術が求められている。¹⁾

このような背景のもと、著者らは高速回転するチェーンの打撃エネルギーを用いた新しいコンクリート廃棄物の骨材再生法を提案してきた^{2), 3), 4), 5)}、本研究は主にこの骨材再生法の実

用化を図る場合に問題となる事項について検討したものである。

2. 実験概要

2.1 破碎処理機

図-1に、コンクリート廃棄物の骨材再生用として開発した破碎処理機（以後、処理機と記す）の概略図を示す。本処理機は、ロッドの周囲に複数本のチェーンを取り付け、これを高速回転させることによって得られる打撃エネルギーにより、ベルトコンベアを通して上部から投入された原材料を打撃し破碎処理するもので、

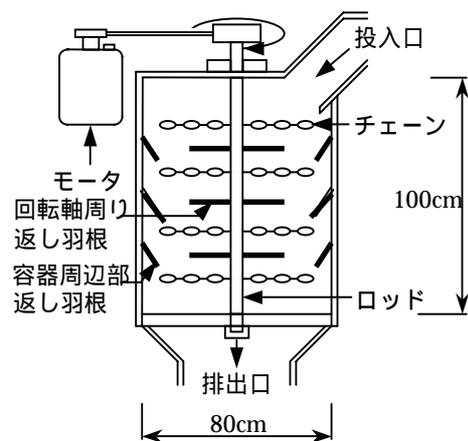


図 - 1 破碎処理機概略図

*1 高松工業高等専門学校専攻科 建設工学専攻 (正会員)

*2 高松工業高等専門学校 建設環境工学科 教授 工博 (正会員)

*3 国土交通省四国地方整備局 港湾空港部 (正会員)

*4 高松工業高等専門学校 建設環境工学科 助手

この打撃エネルギーにより塊の破碎，モルタル部の除去，骨材の角張り部の除去などを行うものである。本処理機には，ロッドに4段のチェーンが取り付けられ，これらのチェーンの間には，チェーンの打撃によって容器周辺に飛散する原材料および回転速度の遅い中心部から落下する原材料をチェーンの所定位置に移動させるために，容器周辺部返し羽根および回転軸周り返し羽根が取り付けられている。本処理機の円筒壁面の材質はSS400，厚さは12mmである。チェーンは，各段に4本，最高16本の範囲で任意に取り付け可能であり，しかも，これらのチェーンは径を16，19，22および26mmの範囲内で任意に取り変えることができる。なお，これらのチェーンの材質はKBC600である。さらに，これらのチェーンは，インバータにより，回転数を0～約2000rpmの範囲内で任意に変えることができる。なお，モータの容量は11kWであり，モータの負荷を測定するために，本処理機には電力計が取り付けられている。

2.2 実験方法

以下に示す方法で人工的に製造したコンクリートガラを一定量計量し，適度に散水して湿らせた後，破碎処理機の投入口より所定のスピードで投入し破碎処理した。破碎後，排出口より試料を取り出し，再生骨材の品質を検討するため，後述する各種の試験を行った。

2.3 実験材料

実験で用いたコンクリートガラは，強度が約40MPa(実際の強度は35.7MPa)を目標に人工的に製造したコンクリートを金槌などで小割りし，最小粒径が15mm，最大粒径が60mmになるようにふるい分けたものを使用した。なお，コンクリートは水セメント比55%，スランプ15cmとし，粗骨材として最大寸法20mmの粗目(G1)と細目(G2)の碎石(いずれも砂岩)を質量比で55：45の割合で混合したものと，細骨材として粗目陸砂(S1)と細目海砂(S2)を質量比で7：3の割合で混合したものを使用した。表-1に，そ

表-1 使用骨材の品質

骨材の種類	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	単位容積 質量(kg/l)	実積率 (%)
粗骨材	2.57	1.50	6.75	1.44	56.9
細骨材	2.58	1.79	2.76	1.59	62.7

表-2 実験要因および水準

検討事項	処理量 (kg/min)	チェーン径(mm) と段数	回転数 (rpm)	隙間 (mm)
回転数 & 処理量	60	22×4	500	15
			600	
			700	
			800	
チェーン組合せ	60	26×4	592	15
		26+26+22+22	639	
		26+22+22+19	688	
		22×4	700	
		26+22+19+19	710	
処理量	90	22×4	857	15
			957	
			1057	
	120	22×4	890	15
			990	
			1090	
隙間	60	22×4	700	30
				45
	90	22×4	957	30
				45
	120	22×4	990	30
				45

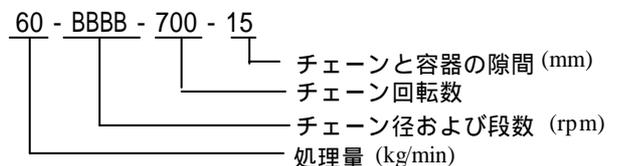


図-2 実験の表記方法

これらの使用骨材の品質を示す。

2.4 実験要因および水準

主に本処理機を実用化する場合に問題となる表-2に示す実験要因と水準について検討した。すなわち，(1)回転数に対する検討，(2)異種チェーンの組み合わせに対する検討，(3)処理量に対する検討，(4)チェーンと容器の隙間に対する検討の4つの要因について，合計20種類の破碎実験を行った。

図-2に，本実験における表記方法の例を示す。前から，コンクリートガラの処理量(kg/min)，チェーン径および段数，チェーンの回転数(rpm)，チェーンの先端と容器の隙間(mm)(以後，隙

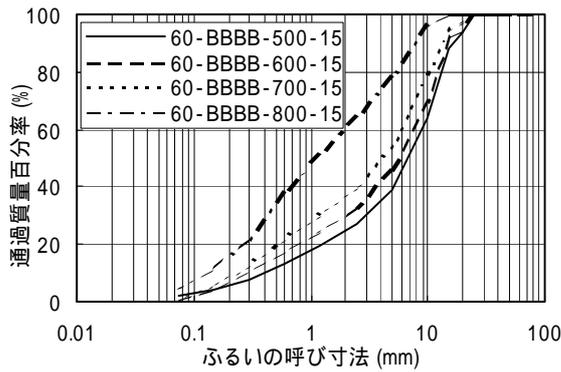


図 - 3 再生骨材の粒度分布

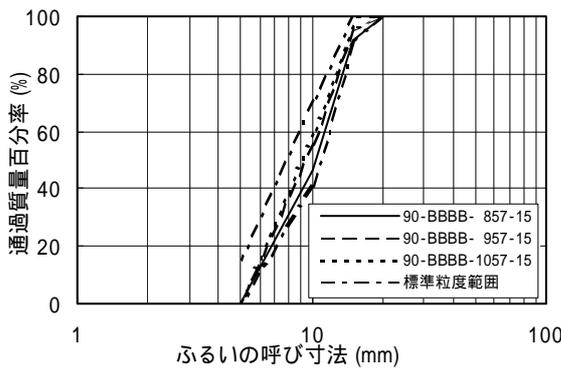


図 - 4 再生粗骨材の粒度分布

間と称す)を記した。チェーン径の組み合わせについては、26mm(以後、26のように記す)をA、22をB、19をC、16をDと表し、英字の個数をチェーン段数(最初が最上段、最後が最下段)とした。各段には同径のチェーンを4本取り付け付けた。

2.5 試験項目および試験方法

破砕処理された再生骨材の品質を評価するために、ふるい分け試験(JIS A 1102)、密度および吸水率試験(JIS A 1109および1110)、単位容積質量および実積率試験(JIS A 1104)の5種類の試験を行った。なお、これらの後の4種類の試験は、一定の粒度分布の再生骨材で実績率を求め各実験ごとの粒形が比較できるようにした。すなわち、試験を行う試料の粒度分布が土木学会に示される標準粒度範囲の上限と下限の平均値を結んだ粒度分布と一致するように、ふるい分けにより各ふるいにとどまった骨材を組み合わせた試料を用いた。その際、粗骨材は5mm以上20mm未満、細骨材は5mm未満の骨材を対象に

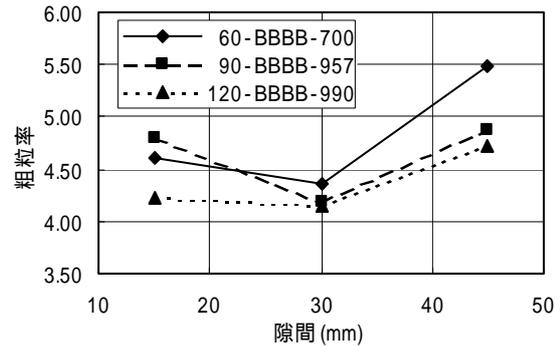


図 - 5 隙間と再生全骨材の粗粒率の関係

試験を行った。

3. 実験結果および考察

以下に、各試験項目に対して数多くある実験結果の中から、その代表的な例について示す。

3.1 ふるい分け試験

図 - 3に、処理量を60kg/min、チェーン径を22、隙間を15mmにして、回転数を4種類に変化させて破砕処理した場合の再生骨材の粒度分布を示す。回転数が多くなる、すなわち打撃エネルギーが大きくなるほど骨材の粒径が小さくなるのが分かる。なお、この処理条件の場合、最適な回転数は約700rpmであった。

図 - 4に、処理量を90kg/min、チェーン径を22、隙間を15mmにして、回転数を変化させた場合の再生粗骨材の粒度分布を示す。同図には、土木学会の標準粒度範囲も示したが、再生粗骨材はいずれの場合も最大寸法20mmの標準粒度範囲内に入ることが分かる。なお、他の実験の場合もほぼ同様な結果となった。

図 - 5に、隙間と粗粒から細粒に至る再生全骨材の粗粒率の関係を示す。隙間は30mmの場合が最も粗粒率は小さくなり、最も効率的に破砕処理されることが分かる。

図 - 6に、処理量と再生全骨材の粗粒率の関係を示す。処理量を多くした場合でも回転数を適切に設定すれば(処理量の増加につれて700、957、990rpmに変化させた)、効率的に破砕処理され粗粒率は小さくなるのが分かる。これは、

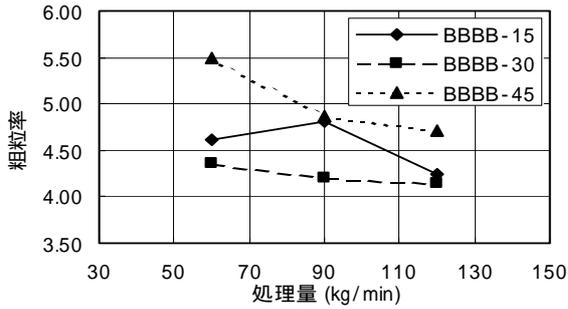


図 - 6 処理量と再生全骨材の粗粒率の関係

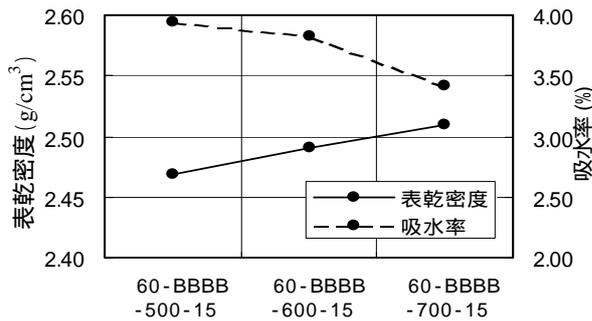


図 - 7 回転数と再生粗骨材の表乾密度および吸水率との関係

表 - 3 再生骨材の品質基準 (案)

	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	5以下	7以下	5以下	10以下

チェーンの破碎処理以外に、骨材相互のすりもみ作用によるためと考えられる。

3.2 密度および吸水率試験

図 - 7 に、回転数と再生粗骨材の表乾密度および吸水率の関係を示す。回転数が多くなるほど、モルタル部分は除去されて表乾密度は大きくなり、吸水率は小さくなって再生骨材の品質は向上することが分かる。

図 - 8 に、隙間と再生粗骨材の表乾密度および吸水率の関係を示す。隙間を 30mm にした場合が、最も効率よくモルタル部分は除去され、再生粗骨材の品質は向上することが分かる。

表 - 3 に、元建設省が通達している再生骨材の品質基準 (案) を示すが、今回製造した再生粗骨材の吸水率は 2.80 ~ 3.94% で 1 種または 2 種であり、処理量、隙間および打撃エネルギーな

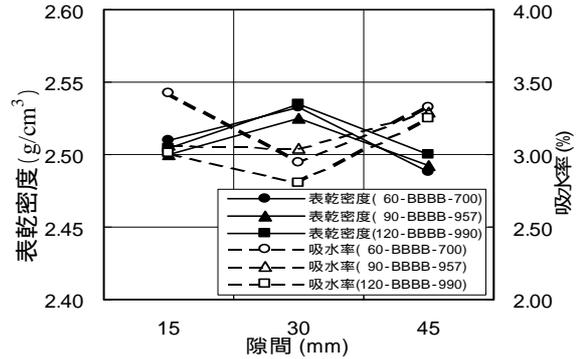


図 - 8 隙間と再生粗骨材の表乾密度および吸水率との関係

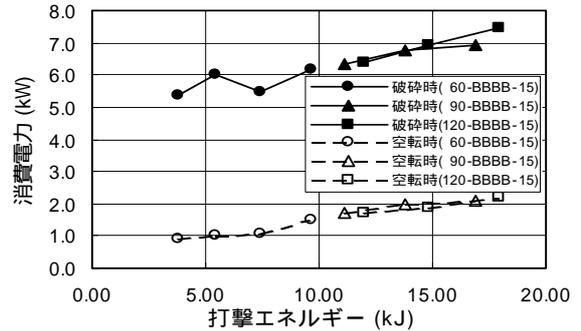


図 - 9 打撃エネルギーと消費電力の関係

どの製造条件を適切に設定することにより、1 種の品質基準を満たす高品質の再生骨材を製造できる可能性があることが分かる。一方、再生細骨材の吸水率は 7.25 ~ 10.40% でほぼ 2 種であり、1 種にするためには、さらに何らかの処理が必要である。

3.3 打撃エネルギーまたは消費電力と各種物性値との関係

図 - 9 に、打撃エネルギーと消費電力の関係を示す。ここに打撃エネルギーとは、等速回転するチェーンの運動エネルギーから誘導された参考文献 4) に示される算定式より求めたものである。同図より、両者はほぼ比例関係にあることが分かる。

図 - 10 に、打撃エネルギーと再生全骨材の粗粒率の関係を示す。処理量ごとに両者の間にはある直線的な関係があり、回転数が多くなり打撃エネルギーが大きくなるほど粗粒率は小さくなることが分かる。また、このような関係は、隙間ごとに存在することが予想され、本実験の

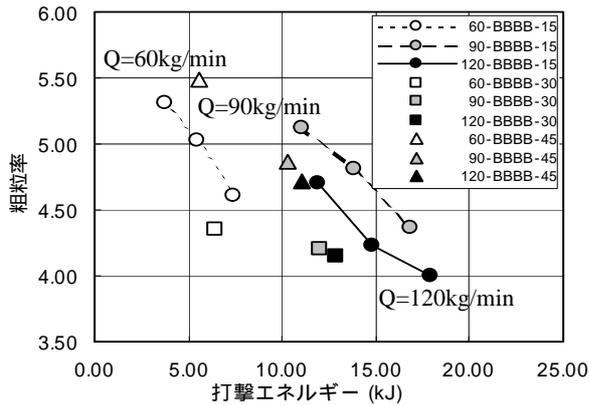


図 - 10 打撃エネルギーと再生全骨材の粗粒率との関係

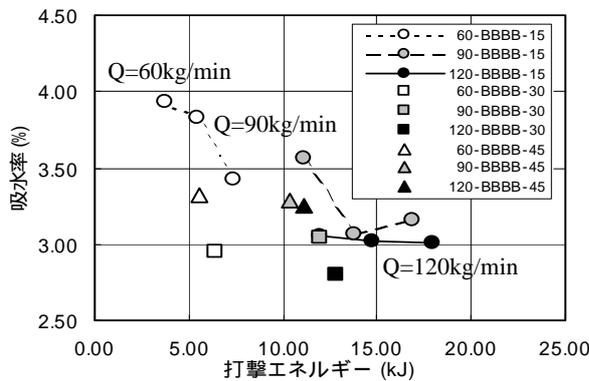


図 - 11 打撃エネルギーと再生粗骨材の吸水率との関係

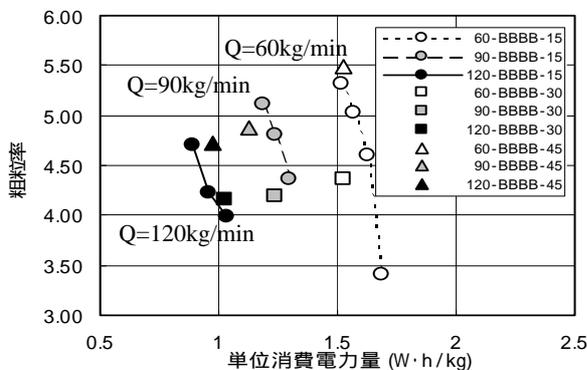


図 - 12 単位消費電力量と再生全骨材の粗粒率との関係

結果では、隙間が 30mm の場合が最も粗粒率が小さくなった。

図 - 11 に、打撃エネルギーと再生粗骨材の吸水率の関係を示す。隙間を 15mm として回転数を変化させた場合では、回転数が多くなり打撃エネルギーが大きくなるほど、さらに処理量が多くなるほど吸水率が小さくなる事が分かる。

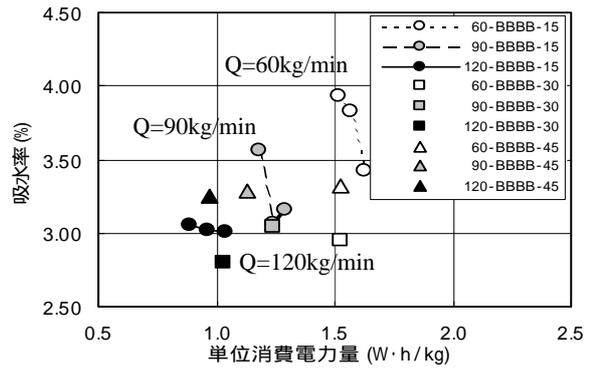


図 - 13 単位消費電力量と再生粗骨材の吸水率との関係

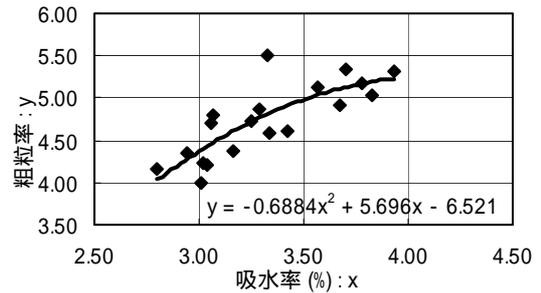


図 - 14 再生粗骨材の吸水率と再生全骨材の粗粒率との関係

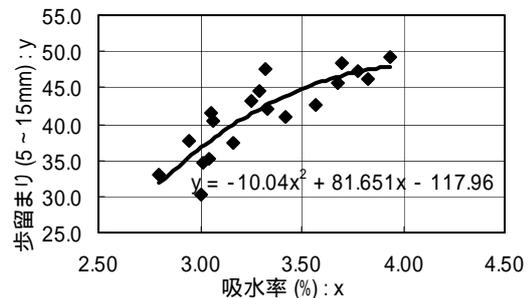


図 - 15 再生粗骨材の吸水率と再生粗骨材の歩留まりとの関係

また、回転数を等しくして隙間を変化させた場合では、隙間が 30mm のときが最も効率よく破砕処理され、吸水率が小さくなる事が分かる。

図 - 12 に、単位消費電力量と再生全骨材の粗粒率の関係を示す。ここに、単位消費電力量とは、破砕処理時の消費電力を処理量で割ったものである。同図より、処理量別に見ると、単位消費電力量が大きくなるほど粗粒率が小さくなる事が分かる。また、処理量が多くなるほど、同一の粗粒率にするための単位消費電力量は少なくて済む事が分かる。

図 - 13 に、単位消費電力量と吸水率の関係を示す。処理量が多くなるほど単位消費電力量および吸水率が小さくなり、しかも隙間は 30mm の場合が最も吸水率は小さくなり品質は向上することが分かる。

図 - 14 に、再生粗骨材の吸水率と再生全骨材の粗粒率の関係を示す。吸水率を小さくするためには粗粒率を小さくしなければならないことが分かる。これは、再生骨材が細粒化されるほど骨材周辺のモルタル部も除去され、吸水率が小さくなるためである。また、吸水率 3% 以下の高品質な再生骨材を製造するためには、本実験の場合粗粒率を約 4.5 以下にしなければならないことが分かる。

図 - 15 に、再生粗骨材の吸水率と再生粗骨材の歩留まり（全骨材のうち粒径が 5～15mm の骨材の割合）の関係を示す。吸水率を小さくすると歩留まりは小さくなり、吸水率 3% 以下にすると歩留まりは約 37% 以下となった。なお、今回のコンクリートガラの配合上の粗骨材量は約 44.9% であり、回収率は約 82% となった。

以上の結果から、実際の再生骨材を製造する場合の製造機の考え方を示すと、以下のようである。まず適当な処理量を設定する。次いで、図 - 14 の吸水率と粗粒率の関係から目標とする粗粒率を設定し、図 - 12 の単位消費電力量と粗粒率の関係からこの粗粒率を得るに必要な単位消費電力量を、さらにこれに処理量を掛けて全体の処理電力を求める。次いで、図 - 9 の打撃エネルギーと消費電力との関係からこの消費電力量と見合う打撃エネルギーを求め、これに対応する回転数を設定すればよいと考えられる。

4. まとめ

本研究の結果、今回行った破砕処理実験の範囲内において、以下の結論が得られた。

- (1) 本処理機により、処理量、チェーンと容器の隙間および打撃エネルギーを適切に設定することで元建設省が通達している

品質基準（案）の 1 種を満たす再生粗骨材を製造できる可能性がある。

- (2) 回転数が再生骨材の粒度や品質に及ぼす影響は大きく、回転数が多くなるほど再生骨材は細粒化され品質も向上する。
- (3) 処理量を多くしても、それに見合う打撃エネルギーを与えれば、再生骨材は細粒化され品質も向上する。また、単位消費電力量も小さくなり経済的である。
- (4) 隙間が再生骨材の粒度および品質に及ぼす影響は大きく、これを 30mm 程度に設定すれば再生骨材は最も細粒化され品質も向上する。
- (5) 前章の末尾に、実際の再生骨材の製造する場合の製造機の考え方を示した。

参考文献

- 1) 重倉祐光ほか：コンクリート用骨材の現状と課題，月刊生コンクリート，Vol.17，No.7，pp.25-40，1998.7
- 2) 竹下治之，松原三郎，東原健一郎：コンクリート廃棄物の骨材再生法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1323-1328，2002.6
- 3) 竹下治之，松原三郎，市川栄徳：新しい処理システムを用いたコンクリート用再生骨材の品質について，廃棄物のコンクリート材料への再資源化に関するシンポジウム論文集，pp.43-48，2002.9
- 4) 市川栄徳，竹下治之，佐原晴也，吉田幸稔：新しい処理システムを用いたコンクリート廃棄物の骨材再生法，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1427-1432，2003.5
- 5) 竹下治之：粒径粒度の優れたコンクリート用骨材製造機の開発，コンクリートテクノ，Vol.22，No.5，pp.27-33，2003.5
- 6) 阿部道彦：コンクリート用再生骨材，コンクリート工学，Vol.35，No.7，pp.42-48，1997.7