

論文 パルスパワーによるコンクリートからの粗骨材の分離回収

重石 光弘^{*1}・浪平 隆男^{*2}・大津 政康^{*3}・秋山 秀典^{*4}

要旨：廃コンクリート塊の建設廃棄物に占める割合は依然として高く，廃コンクリート塊の排出量増大，および天然骨材の需給逼迫への対策として，廃コンクリート塊の構造物のためのコンクリート用骨材として循環利用推進が重要な課題となっている。本研究では，高電圧のパルスパワー技術によって水中パルス放電による廃コンクリート塊から可能な限り品質を損なわぬように骨材を分離回収する技術を提案し，その手法によってコンクリート供試体から分離，回収された粗骨材の品質が，加熱すりもみ法による再生粗骨材と遜色なく，JIS A 5021 に規定される高度処理再生骨材の絶乾密度と吸水率の基準を満たす事が確認された。

キーワード：再生粗骨材，パルスパワー，加熱すりもみ，水中パルス放電，骨材品質評価

1. はじめに

廃コンクリート塊の再利用率は平成 14 年に 98%を達成しておりその後も高い水準を維持しているものの，廃コンクリート塊の建設廃棄物に占める割合は依然として高い。しかし，これまで廃コンクリート塊の主要な再利用先であった路盤材等の需要の伸びがほとんど期待できない一方で，高度成長期に建設された膨大な都市施設が耐用年数を迎えることを背景に，廃コンクリート塊の排出量は今後も増大し続け，平成 22 年には約 1 億 5000 万トンに達すると予想されている。しかも，都市再生施策によりコンクリート構造物の建替えやリニューアルが増加，その際にはやはり多量のコンクリート用骨材が必要となるが，天然骨材の枯渇懸念や環境保全の観点から，良質な骨材の新規採取が年々難しくなっている。

こうした背景より，廃コンクリート塊の排出量増大，および天然骨材の需給逼迫への対策として，廃コンクリート塊の構造物のためのコンクリート用骨材として循環利用推進が重要な課題となり，廃コンクリート塊から可能な限り品

質を損なわぬように骨材を分離回収する技術，すなわち骨材の高度再生処理の開発が進められるようになった。また，廃コンクリート塊を破碎したり，磨砕したりすることによって製造された再生骨材についての品質や利用法についての基準化もすすめられている。

2. 骨材の高度再生処理へのパルスパワーの応用

2.1 既往の高度再生処理技術

廃コンクリート塊の破碎処理とその粒度調整だけの通常の骨材再生処理では，モルタルや硬化セメントペースト分の混入や，骨材に付着したモルタルによる品質低下によって構造物用コンクリートへの再利用が難しい。そこで骨材のみを可能な限り分離，回収するための新たな骨材高度再生処理技術として，廃コンクリート塊を破碎した後に，多段階のふるい分けと磨砕を施したり，磨砕の前に加熱してより骨材の回収率を向上したりする方法が開発されている。

ここでは後述するパルスパワーによる再生粗骨材との比較の参考として，通常の流通経路により入手された破碎処理とふるい，粒度調整を

*1 国立大学法人熊本大学 工学部環境システム工学科助教授 博(工) (正会員)

*2 国立大学法人熊本大学 工学部電気システム工学科助手 博(工)

*3 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科教授 工博 (正会員)

*4 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科教授 工博

経て得られた再生粗骨材（再生クラッシャーラン）と、加熱すりもみ法により回収され再生粗骨材（加熱すりもみ再生粗骨材）のふるい分け試験の結果、ならびに密度試験と吸水率試験の結果を示す。

表－１ ふるい分け試験 I (JIS A 1102)

ふるいの呼び寸法 (mm)	各ふるいを通るものの質量百分率 (%)	
	再生クラッシャーラン	加熱すりもみ再生粗骨材
25	100	100
20	83.0	98.6
15	67.7	85.0
10	27.4	35.0
5	0.0	0.0
2.5	0.0	0.0
粗粒率	6.90	6.67

表－２ 密度・吸水率試験 I (JIS A 1110)

試験項目	再生クラッシャーラン	加熱すりもみ再生粗骨材
絶乾密度	2.5 g/cm ³	2.5 g/cm ³
吸水率	3 %	2 %



図－１ 再生クラッシャーラン



図－２ 加熱すりもみ再生粗骨材

この再生クラッシャーランについては 20mm のふるいに留まるものが過多となっており、平成 17 年 3 月に制定された「JIS A 5021 コンクリート用再生骨材 H」¹⁾における吸水率の規格値に対し僅かに及ばない。図－１に見られるように、再生クラッシャーランは表面に多くのモルタル、またはセメントペーストの残留分が付着しているため、品質が低下する。一方、この加熱すりもみ再生粗骨材については、同規格の RHG2005 に分類され、絶乾密度 2.5g/cm³ 以上、かつ吸水率 3%未満という規格値を満たしている。

ここで、原料となったこれらの元来の骨材品質については不明ではあるが、吸水率が 0.60% の粗骨材で作製されたコンクリートより加熱すりもみ法によって回収された再生粗骨材の吸水率は 1.14%であったとの報告²⁾もあり、これらの機械的な破碎処理では、骨材自体にもやはり損傷を与えてしまうのが実情である。また、表面の付着モルタル分を除去してより高品質な再生骨材を得ようとする磨砕処理によって大量の微粉末が二次廃棄物として発生する問題もある。

2.2 パルスパワーの高度再生処理への利用

パルスパワー技術³⁾とは短時間ではあるが大電力を発生し、それを制御・伝送する技術であり、従来、核融合や加速器などの科学研究の基盤技術として発展してきたが、小型の装置で非常に大きなパワーを得られる特徴から、様々な産業分野への応用が期待されている。

本研究では、廃コンクリート塊より粗骨材を分離、回収するための高度再生処理として、高電圧のパルスパワーを利用した制御破壊技術によって、既往の機械的破碎方法では困難とされていた骨材に残存するモルタル付着分を大幅に低減させ、骨材には損傷を与えず、本来の品質を損なわないままに骨材を分離、回収できる手法を提案し、その可能性について考察した。

水中へ設置された電極間へ高電圧パルスを加加すると、その電極間では放電が形成され、その放電路はプラズマ化する。このプラズマには更に μs の極短時間に GW (ギガワット) の電力

が注入されるため、プラズマ周辺の水は瞬時に加熱されて気化・プラズマ化する（図-3）。

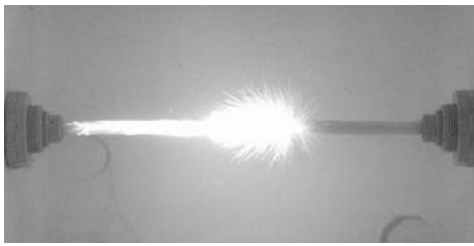


図-3 水中パルス放電の様子

ンクリート塊へ作用することで骨材とセメントの分離を促す

このような水中パルス放電による衝撃波を発生させるために、図-4に示すようなマルクスバンク式パルスパワー発生器を使用する。これは10基のコンデンサを並列接続の状態に充電した後、放電ギャップを通じて瞬時にコンデンサを直列接続として放電させる装置である。

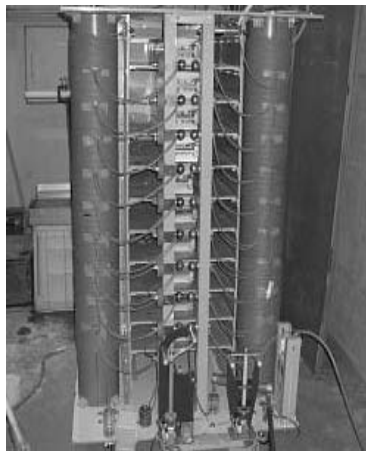


図-4 マルクスバンク式パルスパワー発生器

このプロセスにより生じる水の体積膨張が水中衝撃波の起因となり、生成された衝撃波がコ

また、電極構造を図-5に示す。水中に置かれた5mm角開口のステンレス製半球状メッシュにコンクリート供試体を設置し、ポリエチレン被膜された直径5mmの銅線を高電圧電極とし、

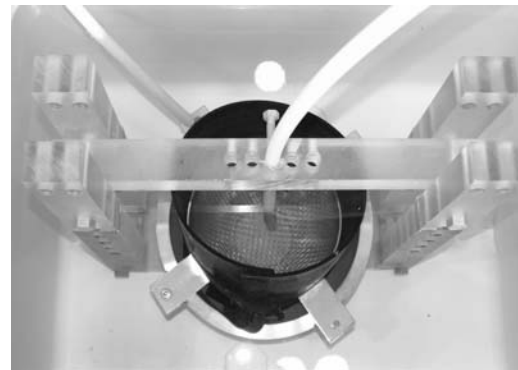


図-5 水中電極の構造

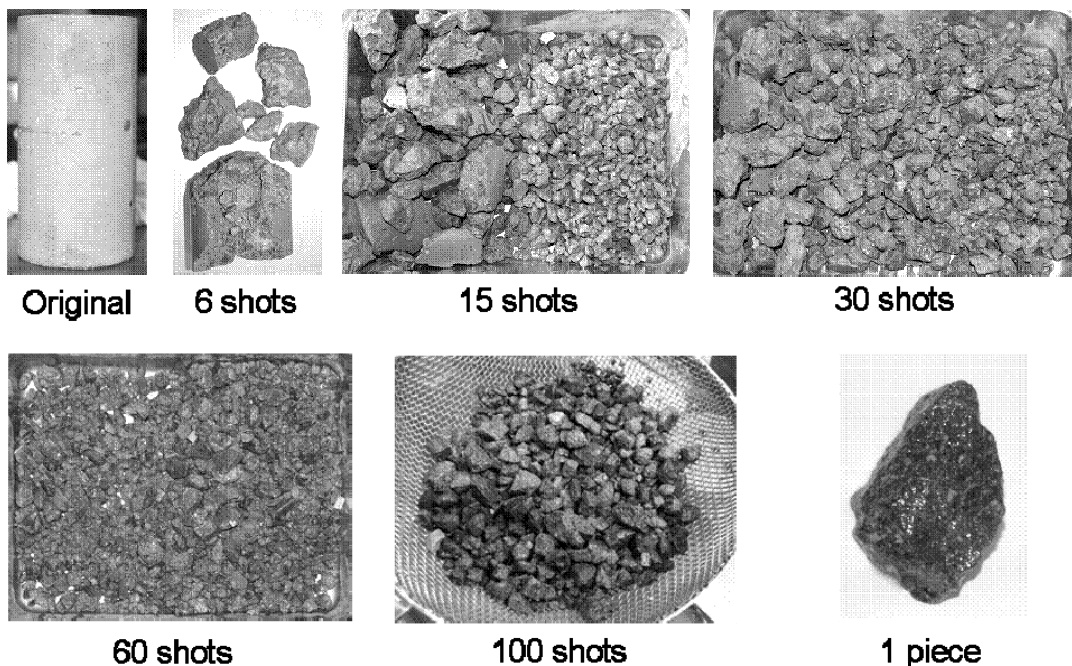


図-6 パルスパワー印加回数ごとのコンクリートの破碎状況

表-3 コンクリート供試体の示方配合

組骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメン ト比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水 <i>W</i>	セメント <i>C</i>	細骨材 <i>S</i>	粗骨材 <i>G</i>	AE 剤 <i>A</i>
20	8	55	6	44	175	318	742	1134	0.095

その下端と破碎対象のコンクリートとを接触させて電極を固定するものである。これにより寸法がおよそ5mmより大きなものがアース電極となるメッシュ上に留まる仕組みとなっている。また衝撃によって破碎されたコンクリート片がメッシュから飛び出さないよう、ゴム製のシートで半球状メッシュの円周上を覆っている。

こうして水中電極のメッシュ上に置かれたコンクリートに対し、高電圧パルス印加すれば、図-6に示すように印加回数とともに次第に破碎が進むこととなり、この原理によるコンクリート塊からの骨材の分離、回収方法を「水中パルス放電方式」として提案した。

3. コンクリート供試体による粗骨材の分離回収

水中パルス放電方式による骨材の分離、回収技術の有効性を考査するため、今回改めて実験室において作製したコンクリート供試体の破碎実験を行い、コンクリート供試体より分離、回収された粗骨材について考察した。

3.1 使用コンクリート供試体

破碎実験に供したコンクリート供試体は、表-3に示す配合によって作製された150mm×150mm×75mmの寸法を持つ直方形の供試体である。使用した原料粗骨材は熊本県山鹿産斑レイ岩であり、そのふるい分け試験と密度・吸水率試験の結果を表-4、ならびに表-5に示す。供試体は打設から28日間水中養生した後、恒温乾燥機にて120±10℃で1週間乾燥させて破碎実験に供したが、これは供試体内部の空隙が水で満たされてしまうと、パルス電流が供試体表面だけを通過してしまうと考えられるためである。

3.2 水中パルス放電の印加

水中パルス放電は図-4に示すマルクスバンク式パルスパワー発生器に電気容量0.8μFのコ

ンデンサ10基を装着し、それぞれに電圧40kVまで充電した後、電圧400kVにて6.4kJのパルスエネルギーを印加することを100回繰り返して電極間の設置されたコンクリート供試体を破碎した。これによって得られた再生粗骨材（パルスパワー再生骨材）の一個の様子を図-7に示す。

表-4 ふるい分け試験Ⅱ (JIS A 1102)

ふるいの 呼び寸法 (mm)	各ふるいを通るものの質量百分率 (%)	
	原料粗骨材	パルスパワー 再生骨材
25	100	100
20	97.6	98.0
15	82.8	89.6
10	36.7	40.8
5	0.0	0.0
2.5	0.0	0.0
粗粒率	6.65	6.61

表-5 密度・吸水率試験Ⅱ (JIS A 1110)

試験項目	原料粗骨材	パルスパワー 再生粗骨材
絶乾密度	3.04 g/cm ³	2.90 g/cm ³
吸水率	0.49 %	1.42 %



図-7 パルスパワー再生骨材

3.3 パルスパワー再生骨材の品質

(1) ふるい分け試験と密度・吸水率試験

水中パルス放電方式により供試体より分離回収されたパルスパワー再生粗骨材のふるい分け試験，ならびに密度・吸水率試験の結果を，供試体の作製に使用した原料粗骨材との比較のために同じ表－4と表－5に示した。

表－4のふるい分け試験の結果から，パルスパワー再生粗骨材は原料粗骨材よりも小粒径化していることが確認できる。これにより，原料粗骨材の粗粒率 6.65 に対し，パルスパワー再生粗骨材は 6.61 に低下している。この主要因としてパルスパワーの衝撃によって原料粗骨材が破碎されたことが考えられる。また完全には破碎されなかったモルタル片が，5mm 目ふるいに残留しているのが多く確認された。

また，絶乾密度の低下，ならびに吸水率の上昇が確認された。これはパルスパワー再生粗骨材に微量のモルタル分が付着していたこと，ほとんどをモルタル分が占めるような5mmのふるい目よりも大きな粒状物が混入していたことが主な要因だと考えられる。また，パルスパワーによって粗骨材内部に亀裂が発生，および進展した可能性も考えられる。

これらの結果は，原料粗骨材と比較してパルスパワー再生粗骨材の若干の細粒化と，絶乾密度と吸水率についても骨材の品質低下を示唆しているが，「JIS A 5021 コンクリート用再生骨材 H」における RHG2005 に分類され，絶乾密度 2.5g/cm^3 以上，かつ吸水率 3.0%以下という規格値を十分に満たしているといえる。

(2) 再生粗骨材製造工程管理用品質試験

先の高度処理再生骨材に関する JIS 標準に先駆けて，平成 16 年 4 月には標準仕様書「TS A 0006 再生骨材を用いたコンクリート」⁴⁾が制定されている。この中の附属書 1 においては，「再生粗骨材の製造工程管理用品質試験方法」として再生粗骨材の吸水率および安定性損失質量の推定値試験方法が規定されている。ここでは再生粗骨材の品質を簡易に評価する指標として 100kN 破

碎値，再生粗骨材の吸水率を簡易に評価する指標として推定吸水率，および再生粗骨材の安定性損失質量を簡易に評価する指標として推定安定性損失質量が示されている。

この標準仕様書に基づいて，本研究において用いた原料粗骨材，実験によって得られたパルスパワー再生粗骨材，さらに参考として採取した再生クラッシャーランと加熱すりもみ再生粗骨材について，これらの評価指標を算出してみた。

ここでは，各再生粗骨材は原粗骨材と同等の粒度分布となるよう粒度調整したものを試料として供して各試験を行った。標準仕様書においては，鋼製容器の中の絶乾粗骨材に対して 100kN の荷重を載荷した場合，2.5mm 以下となる破砕片の全重量に対する割合を 100kN 破砕値とし，その値から推定吸水率と推定安定性損失質量が算出できるとされる。それらの結果を表－6にまとめて示す。

表－6 製造工程管理用品質試験

評価指標 (%)	原料粗骨材	パルスパワー再生粗骨材	再生クラッシャーラン	加熱すりもみ再生粗骨材
100kN 破砕値	1.30	1.80	5.00	1.50
推定吸水率	2.61	3.03	5.75	2.78
推定安定性損失質量	20.8	24.4	46.0	22.2

パルスパワー再生粗骨材の 100kN 破砕値は原粗骨材よりも大きくなっている。これはパルスパワーによって骨材自体の強度が低下したこと，付着しているモルタル片などが載荷することで破碎されたことが要因として考えられる。また原料粗骨材が違うものであるため単純な比較はできないが，パルス再生粗骨材の 100kN 破砕値は，加熱すりもみ再生粗骨材に比べて大きな値を示している。これは前述した要因に加えて，加熱すりもみ再生粗骨材は磨砕処理によって丸

みをおびた形状となっており、パルスパワー再生粗骨材の比較的脆弱な鋭角の部位が破砕によって欠損したことが要因として考えられる。

推定吸水率については、これまでに製造された再生粗骨材の試験をもとに、少なくとも危険側に判断しないよう設定されたものであると考えられる。したがって、実際の吸水率と大きく異なっていることが確認できた。

4. まとめ

廃コンクリート塊の建設廃棄物に占める割合は依然として高い。しかし、これまで廃コンクリート塊の需要の伸びがほとんど期待できない一方で、廃コンクリート塊の排出量は今後も増大し続け、しかも、コンクリート用天然骨材の枯渇懸念や環境保全の観点から、良質な骨材の新規採取が年々難しくなっている。これらのことから、廃コンクリート塊のコンクリート用骨材として循環利用推進がますます重要となり、廃コンクリート塊から可能な限り品質を損なわずに骨材を分離回収する技術、すなわち骨材の高度再生処理の開発が進められるようになっている。

パルスパワー技術とは短時間ではあるが大電力を発生し、それを制御・伝送する技術であり、従来、核融合や加速器などの科学研究の基盤技術として発展してきたが、小型の装置で非常に大きなパワーを得られる特徴から、様々な産業分野への応用が期待されている。

そこで本研究では、廃コンクリート塊より粗骨材を分離、回収するための高度再生処理として、高電圧のパルスパワーを利用した制御破壊技術によって、既往の機械的破砕方法では困難とされていた骨材に残存するモルタル付着分を大幅に低減させ、骨材には損傷を与えず、本来の品質を損なわないままに骨材を分離、回収できる手法を提案し、その可能性について考察した。

すなわち、水中に設置された電極の間にコンクリート塊を設置して、マルクスバンク方式パ

ルスパワー発生器により電極間に高電圧パルスを 100 回印加して、コンクリート塊の破砕を行った。それにより分離、回収されたパルスパワー再生粗骨材の品質と特色について次のような事が確認された。

- (1) 原料粗骨材と比較してパルスパワー再生粗骨材の若干の細粒化と、絶乾密度と吸水率についても骨材の品質低下が見られた。
- (2) これらの原因は、パルスパワー再生粗骨材に微量のモルタル分が付着していたこと、ほとんどをモルタル分が占めるような 5mm のふるい目よりも大きな粒状物が混入していたことが主要な原因であると考えられる。また、パルスパワーによって粗骨材内部に亀裂が発生、および進展した可能性も考えられる。
- (3) 「JIS A 5021 コンクリート用再生骨材 H」における、絶乾密度 2.5g/cm^3 以上、かつ吸水率 3.0%以下という規格値は十分に満たしており、加熱すりもみ法による再生粗骨材と遜色ないものである。
- (4) 「TS A 0006 再生コンクリート」に規定される再生粗骨材の製造工程管理用品質試験による評価指標によっても、加熱すりもみ法による再生粗骨材と同等であると示唆された。最後に、本研究は平成 17 年度九州建設弘済会研究助成事業による助成を受け実施したものであることを付記する。

参考文献

- 1) コンクリート用再生骨材 H, JIS A 5021:2005, 日本規格協会, 2005.3
- 2) 古賀ほか: 製造方法の違いによる再生骨材の物性に関する検討, 土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集, V-228, 445-446, 2002.9
- 3) 秋山, 中司, 寺本, 勝木, 足立: 廃コンクリートリサイクル技術, 静電気学会誌, **25**, 6, 301-305, 2001.12
- 4) 再生骨材を用いたコンクリート, TS A 0006:2004, 日本規格協会, 2004.4