

# 論文 廃コンクリートより粗骨材を分離回収するためのパルスパワー出力の最適化に関する研究

高木 基志\*1・重石 光弘\*2・浪平 隆男\*3・小島 啓介\*4

**要旨:** コンクリート塊からパルス放電方式によって高品質な再生粗骨材を分離回収するための最適なパルスパワー印加条件をパルス発生装置の電気容量, 放電時電圧, 放電エネルギー量の観点より調べた。今回の実験より, パルス放電1回のエネルギー量を1.6kJに設定し, 160回のパルス放電をコンクリート塊に加えたときに回収できた再生粗骨材が, 最も少ないエネルギー量で再生粗骨材Hの絶乾密度, 吸水率の品質規格を満たすことがわかった。また, パルス放電1回当たりのエネルギー量をコンクリートの破碎過程の途中で適宜変更することにより, より高品質な再生粗骨材を回収できる可能性があることが分かった。

**キーワード:** 再生粗骨材, パルスパワー, リサイクル

## 1. はじめに

### 1.1 パルス放電技術による骨材再生

建設廃棄物には, コンクリート塊, 建設汚泥, 建設発生木材, 建設混合廃棄物等があるが, その中でもコンクリート塊の建設廃棄物に占める割合は高く, 平成17年度はコンクリート塊の排出量は3千万トンを超えている。コンクリート塊のリサイクル率は平成14年度, 平成17年度共に98%に達しており, 高い再利用率を維持しているが, その利用用途としては路盤材がほとんどである<sup>1)</sup>。しかし今後コンクリート塊の主なリサイクル先であった路盤材への需要の伸びは期待できない。一方, コンクリート塊の排出量は今後も高い排出量であると予想されている<sup>2)</sup>。そのためコンクリート塊は相当量が余剰となる見込みである。また将来, 天然の資源であるコンクリート用の天然骨材の枯渇も懸念されるため, コンクリート塊をコンクリート用骨材へ活用を推進する必要がある。このような背景によりコンクリート用再生骨材の規格として, 2005年3月にJIS A 5021「コンクリート用再生骨材H<sup>3)</sup>」(表-1)が規定された。

そこでパルスパワー放電技術を用いてコンクリート塊を破碎し良質な再生粗骨材を分離・回収できる可能性について検討してきた。これまでに行った研究からパルスパワー放電技術によって高品質な再生粗骨材を分離・回収が可能なが分かった<sup>4)</sup>。そこで本研究では可能な限り少ないエネルギーで再生粗骨材Hとしての品質を満たす再生粗骨材を回収できるパルスパワー発生装置の出力を検討した。パルスパワー発生装置のコンデンサの電気容量と発生電圧を変化させることにより, パルスパワー放電の一回当たりのエネルギーを変化させ

表-1 再生粗骨材Hの品質規格<sup>3)</sup>

|         | 絶乾密度(g/cm <sup>3</sup> ) | 吸水率(%) |
|---------|--------------------------|--------|
| 再生粗骨材 H | 2.5 以上                   | 3.0 以下 |

回収された再生粗骨材の絶乾密度, 吸水率, 粗粒率から最適な印加条件を調べた。なお, 本手法によって得られた再生粗骨材を以後パルスパワー再生粗骨材と称す。

### 1.2 パルス放電技術について

パルスパワー放電技術とは, 貯蔵されたエネルギーを時空的に圧縮, 重量して, 短時間ではあるが大電力を狭い空間内に集中させ, それを制御・伝送する技術である<sup>5)</sup>。水中でコンクリート供試体にパルスパワーを印加することで再生骨材を回収できる。その破壊現象については以下のように考えられる<sup>6)</sup>。一般的に気体の絶縁破壊度は固体絶縁物よりも低く, 誘電率及び導電率も気体のほうが小さいため, 印加電圧を上昇させると気体の絶縁破壊が先に生じることとなる。一方で, コンクリートにおいてモルタル部分と骨材を比較した場合, モルタル部分の方が空気を多く含んでいると考えられる。そのためモルタル部分のほうが骨材よりも先に絶縁破壊が生じ, 密着した2つの媒体の境界面において絶縁破壊による分離・回収が可能であると考えられる。本研究ではこのパルスパワーによる気体と固体の絶縁破壊をコンクリート破壊制御技術としての応用を試みるものである。

## 2. パルス放電方式によるコンクリート破碎実験

### 2.1 パルス放電方式によるコンクリート供試体破碎実験

本研究でコンクリート供試体破碎のために使用したパルスパワー発生装置はマルクスバンク方式パルスパ

\*1 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科 社会環境工学専攻 (正会員)

\*2 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科准教授 博(工) (正会員)

\*3 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科准教授 博(工) (非会員)

\*4 国立大学法人熊本大学 工学部環境システム工学科 土木環境系専攻 (非会員)

ワー発生装置<sup>7)</sup>と呼ばれるものである。回路図を図-1に示す。この装置は所定の個数のコンデンサを並列接続し充電した後、放電ギャップを通じてこれらのコンデンサを直列接続として放電させる仕組みになっている。コンクリート供試体に水中にてパルスパワーを印加する電極構造は、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て、その下端と破碎前のコンクリート供試体とを接触させて電極を固定した。放電時においてステンレス製半球状メッシュは接地され低電圧電極となっている(図-2)。

尚、5mm角開口を使用する理由は、本研究において再生粗骨材とはコンクリート供試体を破碎時に分離回収された粗骨材の事を示しており、ふるい目5mmを通過するものを除外するためである。

### 2.2 使用したコンクリート供試体について

本研究でパルスパワー再生骨材を取り出すために用いたコンクリート供試体は150×150×75mmの角柱供試体(図-3)である。供試体に使用した粗骨材は熊本県山鹿産の斑レイ岩であり、物理的性質を表-2に示す。コンクリート供試体の示方配合は以下の表-3のとおりである。このコンクリート供試体は打設後28日間水中養生を行い、コンクリート供試体内部の水分を除去するために恒温乾燥機にて105±5℃で1週間乾燥させ質量を一定にさせてから使用した。

### 2.3 パルスパワー印加条件の決定

はじめに、電気容量0.8μFのコンデンサ10個に40kVで充電した後、400kVの高電圧でコンクリート供試体に100回のパルスパワーを印加した<sup>4)</sup>。この時、印加回数20回ごとに密度試験、吸水率試験、ふるい分け試験をそれぞれ行い、パルスパワー再生粗骨材の品質を評価した。その結果、印加回数60回でパルスパワー再生粗骨材は絶乾密度と吸水率が再生粗骨材Hの規定値を満たした。この時の印加1回当たりのエネルギーは6.4kJとなり、100回では640kJとなった。本手法により印加した総エネルギー量は式(1)により算出することができる。

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \times M \times N \quad (1)$$

ここで、Eは総エネルギー量(J)、Cはコンデンサの電気容量(F)、Vはひとつのコンデンサに充電した電圧(V)、Mはコンデンサの個数、Nは印加回数である。

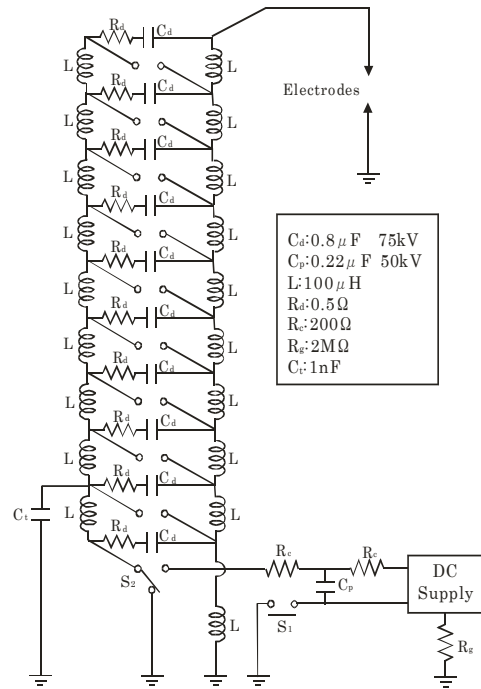


図-1 マルクス発生器回路図

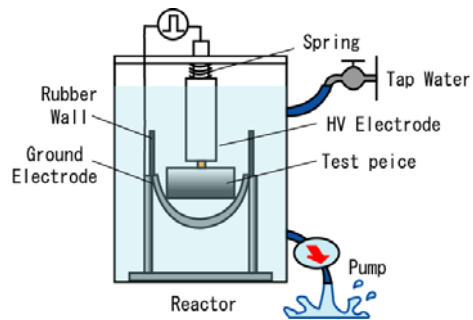


図-2 骨材回収の仕組み



図-3 使用したコンクリート供試体

表-2 原粗骨材の品質

| 絶乾密度(g/cm <sup>3</sup> ) | 吸水率(%) | 粗粒率  |
|--------------------------|--------|------|
| 3.04                     | 0.49   | 6.66 |

表-3 コンクリート供試体示方配合

| 粗骨材の最大寸法(mm) | スランプ(cm) | 水セメント比(%) | 空気量(%) | 細骨材率(%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |         |        |        | AE剤(g/m <sup>3</sup> ) |
|--------------|----------|-----------|--------|---------|-------------------------|---------|--------|--------|------------------------|
|              |          |           |        |         | 水(W)                    | セメント(C) | 細骨材(S) | 粗骨材(G) |                        |
| 20           | 8        | 55        | 6      | 44      | 175                     | 318     | 742    | 1134   | 95                     |

本研究ではより少ないエネルギーでパルスパワー再生粗骨材の絶乾密度と吸水率が再生粗骨材Hの規定値を満たすパルスパワーの印加条件を本研究における最適な印加条件だと考えた。そしてパルスパワーの印加1回当たりのエネルギーを変化させてパルスパワー再生粗骨材の品質について評価した。

パルスパワー放電方式による破碎実験においては電気容量 0.8 $\mu$ F と 0.2 $\mu$ F の2種類のコンデンサをそれぞれ用い、10個または5個のコンデンサに40kVにて充電後、400kV または 200kV の高電圧を発生させた。印加条件は表-4 に示すように、印加1回当たりのエネルギー量ごとに整理すると、電気容量 0.8 $\mu$ F のコンデンサ 10個の時 E/N=6.4kJ、0.8 $\mu$ F のコンデンサ 5個の時 E/N=3.2kJ、0.2 $\mu$ F のコンデンサ 10個の時 E/N=1.6kJ、0.2 $\mu$ F のコンデンサ 5個の時 E/N=0.8kJ の4つの条件で実験を行い、これまでの研究から印加回数 20、40、60、80、100回に相当するエネルギー量 128、256、384、512、640kJ において密度試験、吸水率試験、ふるい分け試験を行うものとした。

### 3. パルスパワー再生粗骨材の密度・吸水率による評価

#### 3.1 密度・吸水率試験

印加条件が 0.8 $\mu$ F・400kV、0.8 $\mu$ F・200kV、0.2 $\mu$ F・400kV、0.2 $\mu$ F・200kV において 640kJ のエネルギー量を印加する際にエネルギー量が 128、256、384、512、640kJ の時に

表-5 印加条件による絶乾密度

| E/N   | 6.4kJ | 3.2kJ | 1.6kJ | 0.8kJ |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 128kJ | 2.46  | 2.47  | 2.51  | 2.35  |
| 256kJ | 2.64  | 2.64  | 2.74  | 2.47  |
| 384kJ | 2.80  | 2.85  | 2.95  | 2.78  |
| 512kJ | 2.94  | 2.99  | 3.01  | 2.95  |
| 640kJ | 2.98  | 3.03  | 3.03  | 3.01  |

(g/cm<sup>3</sup>)

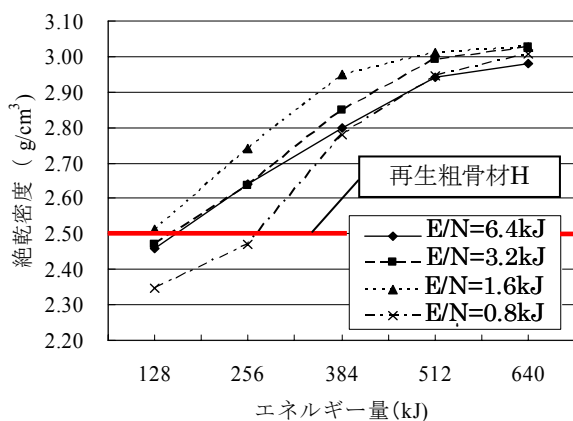


図-4 エネルギー量に伴った絶乾密度の変化

表-4 印加条件

| E/N        | 6.4kJ       | 3.2kJ       | 1.6kJ       | 0.8kJ       |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 128kJ      | 20回         | 40回         | 80回         | 160回        |
| 256kJ      | 40回         | 80回         | 160回        | 320回        |
| 384kJ      | 60回         | 120回        | 240回        | 480回        |
| 512kJ      | 80回         | 160回        | 320回        | 640回        |
| 640kJ      | 100回        | 200回        | 400回        | 800回        |
| コンデンサの電気容量 | 0.8 $\mu$ F | 0.8 $\mu$ F | 0.2 $\mu$ F | 0.2 $\mu$ F |
| コンデンサの個数   | 10個         | 5個          | 10個         | 5個          |
| 印加電圧       | 400kV       | 200kV       | 400kV       | 200kV       |

※E/N は印加1回当たりのエネルギー量  
E は総エネルギー量

密度試験、吸水率試験をそれぞれ行った。その結果を表-5、表-6、図-4、図-5 に示す。結果はエネルギー量ごとに整理した。

#### 3.2 密度と吸水率による評価

電気容量 0.8 $\mu$ F、印加電圧 400kV において印加1回のエネルギーが E/N=6.4kJ で印加して得られたパルスパワー再生粗骨材は、再生粗骨材Hの規定値を絶乾密度は印

表-6 印加条件による吸水率

| E/N   | 6.4kJ | 3.2kJ | 1.6kJ | 0.8kJ |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 128kJ | 5.34  | 5.31  | 5.21  | 8.34  |
| 256kJ | 3.75  | 3.91  | 2.94  | 5.37  |
| 384kJ | 2.43  | 2.02  | 1.09  | 2.46  |
| 512kJ | 1.58  | 1.06  | 0.84  | 1.03  |
| 640kJ | 1.55  | 0.71  | 0.57  | 0.61  |

(%)

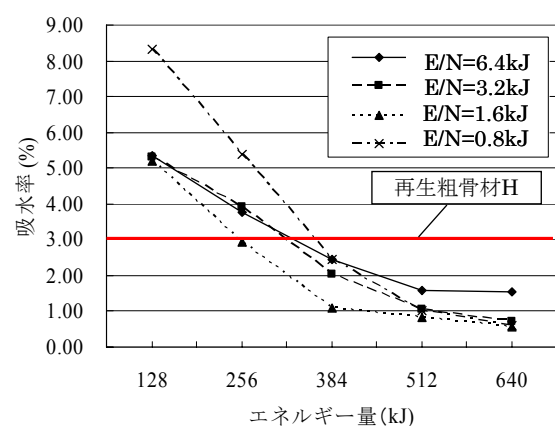


図-5 エネルギー量に伴った吸水率の変化

加エネルギー量 256kJ において満たし、吸水率は印加エネルギー量 384kJ において満たした。電気容量 0.8 $\mu$ F, 印加電圧 200kV で印加 1 回のエネルギーが E/N=3.2kJ の時に、再生粗骨材 H の規定値を絶乾密度は印加エネルギー量 256kJ の時に満たし、吸水率は印加エネルギー量 384kJ の時に満たした。電気容量 0.2 $\mu$ F, 印加電圧 400kV, E/N=1.6kJ において、再生粗骨材 H の規定値を絶乾密度は印加エネルギー量 128kJ の時に満たし、吸水率は印加エネルギー量 256kJ の時に満たした。電気容量 0.2 $\mu$ F, 印加電圧 200kV で印加 1 回のエネルギーが E/N=0.8kJ の時に、再生粗骨材 H の規定値を絶乾密度は印加エネルギー量 384kJ の時に満たし、吸水率は印加エネルギー量 384kJ の時に満たした。

試験結果からどの印加条件でも印加回数が増えると、絶乾密度は大きくなり、吸水率は小さくなった。これは印加回数が増え、付着モルタル分が原粗骨材から剥離し、パルスパワー再生粗骨材の品質が向上したと考えることができる。また、今回の実験では印加 1 回当たりのエネルギーがどの条件でも吸水率が絶乾密度よりも先に再生粗骨材 H の規格を満たすことはなかった。印加エネルギー量 384kJ には絶乾密度、吸水率ともに再生粗骨材 H の品質規格を十分に満たした。印加 1 回のエネルギーが E/N=3.2kJ, E/N=1.6kJ においては印加エネルギーが 640kJ の時のパルスパワー再生粗骨材の絶乾密度が 3.03g/cm<sup>3</sup> となり、原粗骨材の 3.04 g/cm<sup>3</sup> に非常に近づいた。また、一度に印加するエネルギー量が最も少ない 0.2 $\mu$ F・200kV では他の印加条件に比べて印加エネルギーが少ない時には絶乾密度は低く、吸水率は高い。このことから一度に印加するエネルギーが小さいとコンクリート塊を細かく破碎をしていくのではないかと考えられる。また、印加 1 回のエネルギーが E/N=1.6kJ のとき、印加されたエネルギーが同じ時には絶乾密度は他の条件に比べ最も高かった。また、吸水率は最も低かった。そして、再生粗骨材 H の規格を絶乾密度は印加エネルギーが 128kJ のときに、吸水率は印加エネルギーが 256kJ のときに満たした。このことから、印加 1 回のエネルギーが E/N=1.6kJ 場合に印加エネルギー 256kJ, 印加回数 160 回で絶乾密度、吸水率について再生粗骨材 H の規格を満たした。

#### 4. パルスパワー再生粗骨材の粗粒率による評価

##### 4.1 ふるいわけ試験

印加条件が 0.8 $\mu$ F・400kV, 0.8 $\mu$ F・200kV, 0.2 $\mu$ F・400kV, 0.2 $\mu$ F・200kV において 640kJ のエネルギー量を印加する際にエネルギー量が 128, 256, 384, 512, 640kJ の時にふるいわけ試験をそれぞれ行った。その結果を図-6, 図-7, 図-8, 図-9 に、また、粒度曲線より得られた

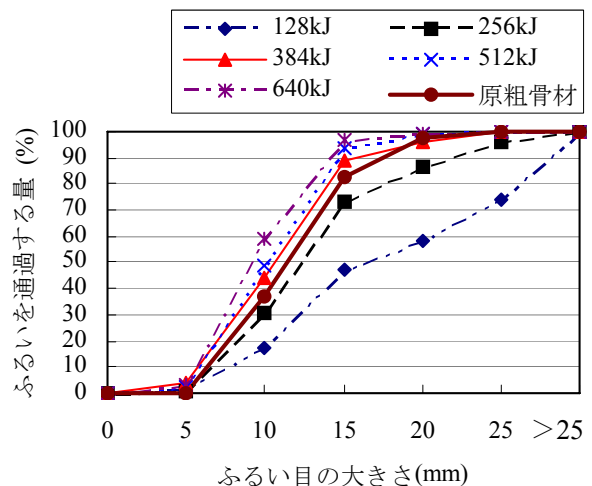


図-6 E/N=6.4kJ の粒度曲線

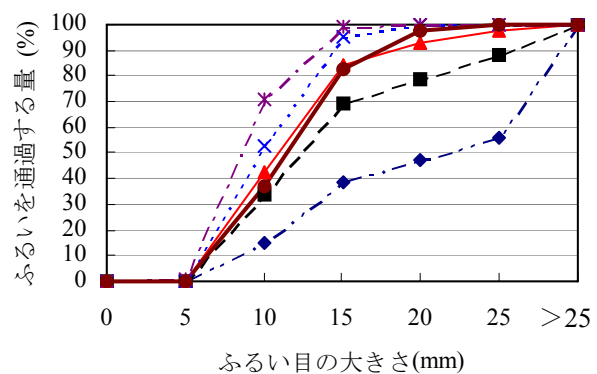


図-7 E/N=3.2kJ の粒度曲線

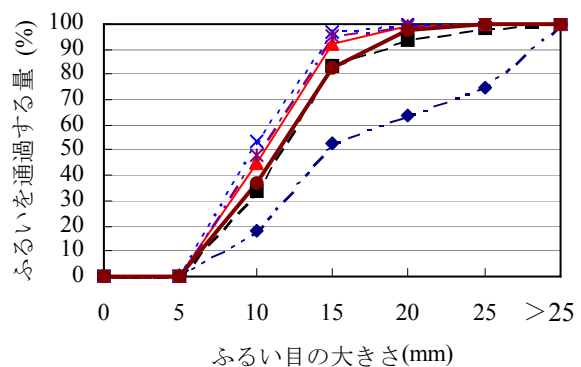


図-8 E/N=1.6kJ の粒度曲線

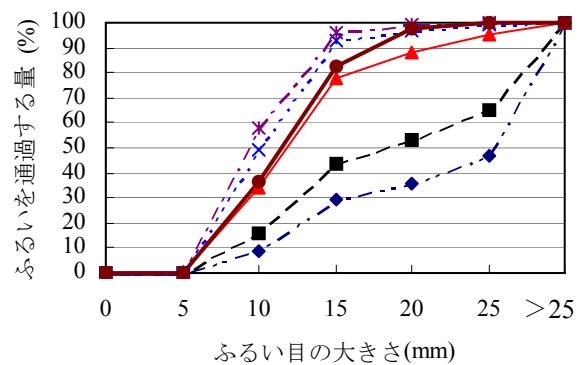


図-9 E/N=0.8kJ の粒度曲線

粗粒率を表-7, 図-10 に示す。結果はエネルギー量ごとに整理をした。

#### 4.2 粒度曲線と粗粒率による評価

電気容量 0.8 $\mu$ F, 印加電圧 400kV で一回の印加エネルギーが E/N =6.4kJ において, 図-6 の粒度曲線から印加エネルギー384kJ で原粗骨材よりも細粒化が進んでいることがわかった。電気容量 0.8 $\mu$ F, 印加電圧 200kV, E/N =3.2kJ において, 図-7 の粒度曲線から印加エネルギー384kJ で原粗骨材よりも細粒化が進んでいることがわかった。また, 電気容量 0.8 $\mu$ F, 印加電圧 200kV, E/N =3.2kJ においては, 図-8 の粒度曲線から印加エネルギー256kJ で原粗骨材の粒度曲線と非常に近くなり, 384kJ で原粗骨材よりも細粒化が進んでいることがわかった。電気容量 0.2 $\mu$ F, 印加電圧 200kV, E/N =0.8kJ において, 図-9 の粒度曲線から印加エネルギー512kJ で原粗骨材よりも細粒化が進んでいることがわかった。粗粒率においても表-7, 図-10 から E/N =6.4kJ の粗粒率は印加エネルギー384kJ において原粗骨材の粗粒率 6.66 よりも小さくなった。同様に, E/N =3.2kJ, E/N =1.6kJ の粗粒率においても印加エネルギー384kJ には原粗骨材の粗粒率よりも小さくなった。E/N =0.8kJ においては, 512kJ の印加エネルギーの時に原粗骨材の粗粒率よりも小さくなり, 細粒化が起こった。

#### 4.3 粗粒率と吸水率による品質評価

印加回数が増えるとコンクリート塊が破砕され, 再生粗骨材の周りに付着しているモルタル分が剥離し, 粗粒率は小さくなった。つまりパルスパワー再生粗骨材は印加回数の増加に伴い高品質になるが, 同時に原粗骨材に比べ細粒化が起こることが分かった。ここで, 最適な印加条件を見つけるために, 今回の実験において吸水率が再生粗骨材Hの規格を満たせば, 絶乾密度も満たしているので, 吸水率と粗粒率の変化に着目をした。印加エネルギー量に伴った粗粒率の変化の様子を見ると, 昨年までの実験において印加実験の前半と後半で粗粒率の変化割合が図-11 のように2つに分けられるのではないかと考えた<sup>4)</sup>。これは印加エネルギー量が 128kJ から 256kJ までは主にモルタル分の破砕が起こり, 印加エネルギー量が 384kJ 以降では粗粒率が原粗骨材よりも小さくなることから, 原粗骨材の破壊が起こったのではないかと考えられる。そのため, 粗骨材に比べ脆弱なモルタル分の破砕は, 骨材の破壊が起こっているときに比べ粗粒率の変化の割合が大きいと考えられる。吸水率も粗粒率の変化の様子が変わったところの前後で再生粗骨材Hの規定値を満たした。このことから粗粒率の変化の様子が変わったところが最適な印加回数になるのではないかと考えられた。しかし今回の実験では図-10 から分かるように, E/N=0.8kJ の粗粒率の変化の様子を単純に2つに分け

表-7 印加条件による粗粒率

| E/N   | 6.4kJ | 3.2kJ | 1.6kJ | 0.8kJ |
|-------|-------|-------|-------|-------|
| 128kJ | 7.23  | 7.38  | 7.18  | 7.55  |
| 256kJ | 6.82  | 6.87  | 6.73  | 7.31  |
| 384kJ | 6.56  | 6.64  | 6.56  | 6.78  |
| 512kJ | 6.50  | 6.47  | 6.52  | 6.54  |
| 640kJ | 6.38  | 6.28  | 6.47  | 6.43  |

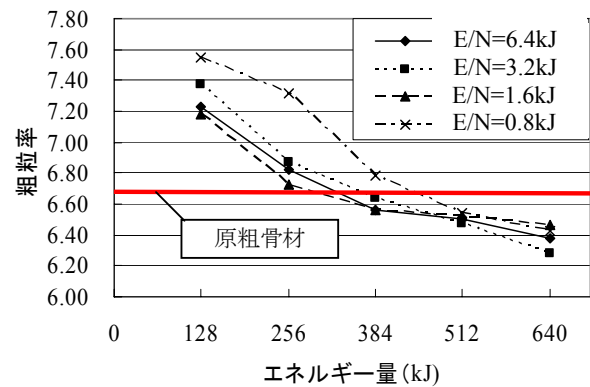


図-10 エネルギー量に伴った粗粒率の変化

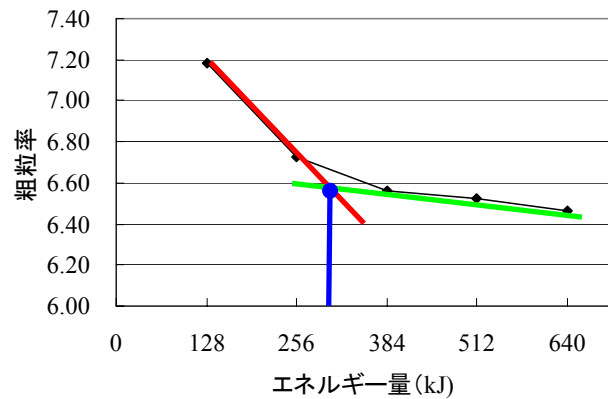


図-11 E/N=1.6kJ における粗粒率の変化

ることが難しく, すべての場合に適用できない可能性があることが分かった。今回の実験ではE/N=1.6kJにおいて印加エネルギー量 256kJの時に絶乾密度, 吸水率ともに再生粗骨材Hの品質規格を満たし, エネルギー量が最も少ないので最適な印加条件だと考えられる。このとき, 図-11 から印加エネルギー量 256kJ付近で粗粒率の変化の様子が変わり, 粗粒率の変化から最適な印加エネルギーを求めることに適用できると考えられる。また, E/N=0.8kJ において前半は粗粒率の変化が他の印加条件に比べて小さい。これは一度あたりの印加エネルギー量の少ないことが原因だと考えられる。絶乾密度や吸水率

から、一度に印加するエネルギー量が小さい方が原粗骨材に与える損傷が少ないと考えられ、細かくコンクリートを破砕できると考えられる。そこで、最初は一度あたりのエネルギー量を大きくし効果的にコンクリートを破砕し、次第に一度あたりに印加するエネルギー量を小さくすることで効率的により品質のよい再生粗骨材が回収できる可能性があると考えられる。

## 5. まとめ

本研究ではパルス放電方式によりコンクリート塊の破砕を行い高品質な再生粗骨材 H を分離、回収する際の最適な印加条件について、パルス放電発生装置の電気容量、発生電圧、印加回数とエネルギー量について検討した。その結果、再生粗骨材 H の品質規格を絶乾密度、吸水率は電気容量  $0.2\mu\text{F}$ ・印加電圧  $400\text{kV}$  のとき印加エネルギー量  $256\text{kJ}$  のときに、その他の場合でも印加エネルギー量  $384\text{kJ}$  で満たした。また、粗粒率においては電気容量  $0.2\mu\text{F}$ ・印加電圧  $200\text{kV}$  のとき印加エネルギー量  $512\text{kJ}$  以降で、その他の印加条件では印加エネルギー量  $384\text{kJ}$  以降で原粗骨材の粗粒率に比べ若干細粒化した。今回の実験では電気容量  $0.2\mu\text{F}$ ・印加電圧  $400\text{kV}$ 、 $E/N=1.6\text{kJ}$  において印加エネルギー量  $256\text{kJ}$  の時に絶乾密度、吸水率ともに再生粗骨材 H の品質規格を満たしエネルギー量が最も少ないので最適な印加条件だと考えられる。また、粗粒率の変化の様子から最適な印加エネルギー量

を調べる手法を適用できる場合とできない場合があることが分かった。また一度に印加するエネルギー量を途中で変えることにより、効率的に再生粗骨材を回収できる可能性があると考えられる。これらのことから、今後は、品質、時間、コスト等のあらゆる要素を考慮して、最適な印加条件、印加回数を模索していく予定である。

## 参考文献

- 1) 国土交通省総合政策局：建設廃棄物品目別排出量 平成 17 年度 建設副産物実態調査結果，2006.12
- 2) 国土交通省総合政策局：建設リサイクルの推進について，2003.7
- 3) 日本規格協会：JIS A 5021 コンクリート用再生骨材 H，2005.3
- 4) 高木基志（他）：「水中放電加衝撃により廃コンクリートから回収された粗骨材の品質管理」，平成 18 年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.827-828，2007.2
- 5) 秋山秀典：高電圧パルスパワー工学，オーム社，pp.1-2，2003.12
- 6) 秋山秀典：高電圧パルスパワー工学，オーム社，pp.36-38，2003.12
- 7) 秋山秀典：高電圧パルスパワー工学，オーム社，pp.95，2003.12