

# 論文 コンクリートの物性が水中における高電圧パルス放電による破碎に及ぼす影響について

石松 宏一<sup>\*1</sup>・飯笹 真也<sup>\*2</sup>・浪平 隆男<sup>\*3</sup>・重石 光弘<sup>\*4</sup>

**要旨:** 水中パルスパワー放電法によって回収される再生粗骨材の破碎の過程にコンクリートの物理的性質が及ぼす影響について検討を行った。コンクリート内部空気量ならびにモルタル部と粗骨材の密度の差異が及ぼす影響について、放電印加後に回収される再生骨材のふるい分け、密度、吸水率試験の結果よりその品質の向上の推移を観察した。その結果、内部空気量が多く、モルタル部が低密度で、一方、粗骨材の密度が高いほど放電印加後、早期の再生粗骨材の密度上昇、吸水率低下が見られた。これより水中パルスパワー放電法によるコンクリート破碎の進行にモルタル部の物性および粗骨材種が大きく影響することが確認された。

**キーワード:** 再生粗骨材, パルスパワー, 絶縁破壊, 衝撃波

## 1. はじめに

### 1.1 水中パルスパワー放電法による骨材再生

コンクリート構造物に利用することのできる高品質な再生骨材として、構造物の解体などによって発生したコンクリート塊に対し、破碎、研磨、分級等の高度な処理を行って製造した再生粗骨材の品質基準 JIS A 5021 「コンクリート用再生粗骨材H<sup>1)</sup>」が規定されている。そこで廃コンクリート塊の再生処理に高電圧のパルスパワーを利用した水中パルスパワー放電法を提案し、実用化を目指している<sup>2)</sup>。本手法の優位性として、従来の機械処理と比較して処理コストが少なく、骨材に損傷を与えずに回収が可能である点が挙げられる。

本研究では、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する構造とした(図-1)。

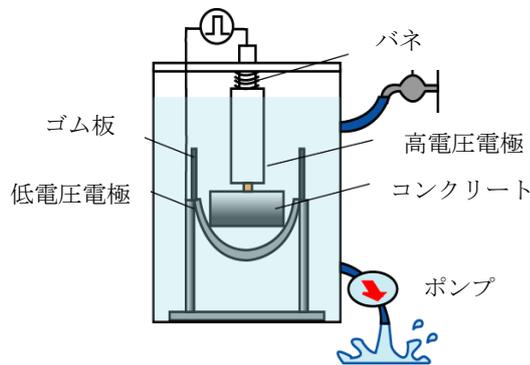


図-1 骨材回収の仕組み

これまでの研究において水中パルスパワー放電法を用いて、コンクリートを破碎し、粗骨材を回収した際の品質に関してふるい分け試験、密度・吸水率試験を実施してその評価を行った。その結果、図-2のようにコンクリートに印加する放電エネルギー量が少ない処理の初期段階において回収される試料は原粗骨材と同程度の大きさになるまで急速に細粒化し、同程度になった段階から粗粒率の低下量は小さくなることが判明した<sup>3)</sup>。

これは、従来の加熱すりもみ法や機械すりもみ法のような機械処理による物理的手法とは異なり電気的手法を用いていることが要因となっていると考えられる。さらに、この粗粒率の変化は、密度の高い粗骨材を使用した場合には粗粒率の低下量が小さく、細粒化するために多くの放電エネルギー量を消費することが確認されており、高電圧のパルス放電による処理においてコンクリートの使用骨材種や密度の差異による影響が示唆された。そこで、本研究ではコンクリート中のモルタル部の物性および使用している粗骨材の物性のそれぞれに着目してその差異が及ぼす影響を確認することを目的とする。

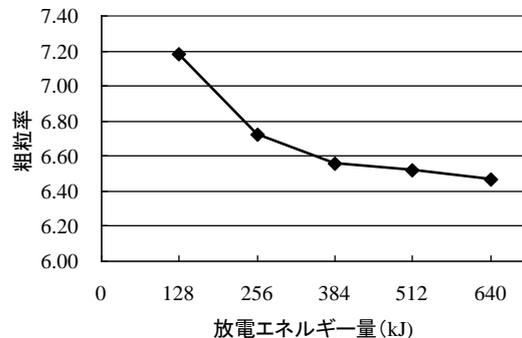


図-2 粗粒率の推移

\*1 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科 工修 (学生会員)

\*2 国立大学法人熊本大学 イノベーション推進機構 工博 (正会員)

\*3 国立大学法人熊本大学 バイオエレクトリクス研究センター 工博 (非会員)

\*4 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科准教授 工博 (正会員)

## 1.2 水中パルスパワー放電法による破砕原理

一般的に気体の絶縁破壊強度が固体の絶縁破壊強度よりも低く、誘電率、導電率も気体の方が小さいため、印加電圧を上昇させると気体の絶縁破壊が優先的に発生する。この現象を利用することによって、コンクリート中に含まれる空隙で優先的に絶縁破壊が発生するため、コンクリート中におけるモルタル部分が破壊され、再生骨材が回収可能となる。高電圧パルスパワーがコンクリート内に放電された場合、コンクリート中に存在する空隙において、気体が絶縁破壊を起こす。気体が絶縁破壊を起こしプラズマが生成された場合、急激な体積膨張が発生する。この体積膨張によって、コンクリート中にひびわれが発生する。そして、放電が繰り返し行われ、空隙部分における絶縁破壊が連続して発生することによりモルタル部分の破壊が発展する。また、プラズマ生成時における急激な体積膨張によって衝撃波が発生する。衝撃波はコンクリート中を伝播し、コンクリート中に含まれる骨材、あるいはセメントペースト硬化体、および空隙、モルタルと粗骨材の境界面に達する。このとき衝撃波は、これらの境界面においてエネルギーを放出し、特に物理的諸性質が異なるモルタルと粗骨材間およびセメントペーストと細骨材間において透過波と反射波に分離する。そして、透過波と反射波に分離する際に、その境界面において引張応力が発生する。この引張応力によって粗骨材からのモルタルの剥離、および細骨材からのセメントペーストの剥離が生じる(図-3)。

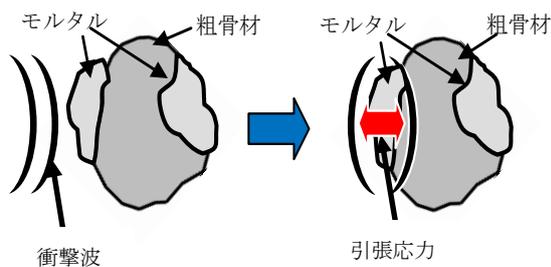


図-3 モルタル剥離のメカニズム

## 1.3 コンクリート破砕と音響インピーダンス

水中パルスパワー放電法によるコンクリートの破砕において、放電エネルギー量の少ない放電初期段階では主に優先的な供試体内部気体の絶縁破壊によるモルタルの選択的な破砕によって細粒化していると推測される。したがって、コンクリート内部の空気量の多い場合に破砕が速く進行していると考えられる。一方、粗粒率の低下率がゆるやかになるまでパルス放電を印加した場合、コンクリート内部空隙の絶縁破壊での急激な体積膨張に付随して発生した衝撃波によってモルタルの剥離が卓越

し、粗骨材が細粒化していると推測される。衝撃波がモルタル中を伝播し、粗骨材との界面で透過波と反射波に分かれたとき、反射波の割合は、粗骨材とモルタルの音響インピーダンスの比によって決定されることから、放電後半の破砕過程は粗骨材とモルタルの音響インピーダンスの比に依存していると考えられる。音響インピーダンスとは式(1)で定義される。

$$Z = \rho \times V_p \quad (1)$$

Z: 音響インピーダンス(kg/m<sup>2</sup>・s)

$\rho$ : 粗骨材, モルタルの密度(g/cm<sup>3</sup>)

$V_p$ : 縦波速度(m/s)

音響インピーダンスの数値は、モルタルおよび粗骨材の密度に依存することから本研究では、密度や骨材種の差異による比較を行い破砕の進行に及ぼす影響を検討する。

## 2. モルタル部の物性が破砕に及ぼす影響の検討

### 2.1 供試体配合

コンクリート中のモルタル部の物性すなわち密度及び内部空気量が水中パルスパワー放電法による破砕過程に及ぼす影響を検討するために、コンクリートに使用する細骨材の種類を変えてモルタル部の密度を変化させる手法をとり、その密度の異なる2種類のコンクリート供試体に関して同様に空気量を調整した。示方配合を表-1に示す。表-2のように粗骨材はすべての供試体において熊本県山鹿産の斑レイ岩(骨材最大寸法: 20mm)を使用し、細骨材については熊本県山鹿産の川砂と既往の研究において水中パルスパワー放電法によって廃コンクリート塊から回収した再生細骨材の2種類を使用したコンクリート供試体(φ100×200mm)を作製した。ここでの再生細骨材とは、既往の研究で水中パルスパワー放電法によってコンクリート供試体から粗骨材を回収する際に5mmのふるいによって分離、回収され、さらにふるい分けによって0.15mm以下の微粉末を取り除いたものである。粗骨材の体積は一定、細骨材とセメントの体積も一定とし、それぞれ空気量が3%, 6%, 9%となることを目標として混入するAE剤を調整し、コンクリート供試体を作製した。尚、使用する骨材はすべて表乾状態にして計量を行った。川砂を使用した場合にコンクリート供試体をC、モルタル供試体をMとし再生細骨材を使用した場合にコンクリート供試体をRC、モルタル供試体をRMと称する。各供試体において後ろにつく数字はフレッシュ時の空気量を示す(表-3)。尚、縦波速度は、コンクリート供試体をはさんだ2つのセンサ間のP波到達時間から算出した。

表-1 コンクリート供試体示方配合

供試体	スランブ (cm)	空気量 (実測値) (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				AE 剤 (g/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (MPa)
					水	セメント	細骨材	粗骨材		
					W	C	S	G		
C3	8	3(3.2)	55	44	175	318	742	1134	159	32.52
C6	8	6(6.5)	55	44	175	318	742	1134	636	26.19
C9	8	9(8.8)	55	44	175	318	742	1134	1113	23.49
RC3	8	3(4.0)	55	52	174	318	809	967	318	19.54
RC6	8	6(5.2)	55	52	173	318	809	967	954	20.55
RC9	8	9(9.8)	55	52	173	318	809	967	1272	2.79

表-2 使用骨材

	絶乾密度(g/cm <sup>3</sup> )	吸水率(%)
斑レイ岩	3.06	0.49
川砂	2.58	3.07
再生細骨材	2.36	9.80

表-3 モルタル, 粗骨材の密度

供試体	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	音響インピーダンス (kg/m <sup>2</sup> ・s)
M3	1.94	6.09×10 <sup>6</sup>
M6	1.86	5.72×10 <sup>6</sup>
M9	1.83	5.42×10 <sup>6</sup>
RM3	1.90	5.58×10 <sup>6</sup>
RM6	1.75	5.09×10 <sup>6</sup>
RM9	1.70	4.81×10 <sup>6</sup>
斑レイ岩	3.06	2.07×10 <sup>7</sup>

## 2.2 コンクリート破砕実験

C3, C6, C9, RC3, RC6, RC9 の計 6 種類の円柱コンクリート供試体を各 4 本作製し、破砕実験のパルス放電条件として電気容量 0.2 μF のコンデンサを 10 基、充電電圧を 40kV に設定した。この放電条件においては放電 1 回あたりのエネルギー量は 1.6kJ に相当する。総放電エネルギー量が 1250kJ (繰り返し放電回数 782 回) に至るまで 250kJ に達する毎にその都度取り出し、繰り返し放電を行った。本研究ではふるい目 5mm を通過するものを除外するため、5mm 角開口のステンレス製半球状メッシュによって分離回収された再生粗骨材について密度試験、吸水率試験およびふるい分け試験を実施した。

## 2.3 密度・吸水率試験による破砕過程の観察

各試料の密度及び吸水率を調べるために、各円柱供試体にパルス放電を印加し、放電エネルギー量が 250kJ, 500kJ, 750kJ, 1000kJ, 1250kJ のそれぞれに達した時点において回収し、試料の密度試験及び吸水率試験を実施した。密度・吸水率試験結果を図-4~図-7 に示す。尚、

各試験結果は円柱供試体 4 本の平均である。以後、C3 から回収された試料を A3, C6 から回収された試料を A6, C9 から回収された試料を A9, RC3 から回収された試料を RA3, RC6 から回収された試料を RA6, RC9 から回収された試料を RA9 と称する。

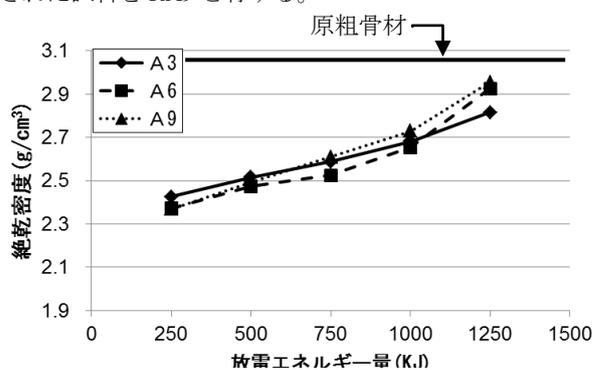


図-4 A3, A6, A9 の絶乾密度

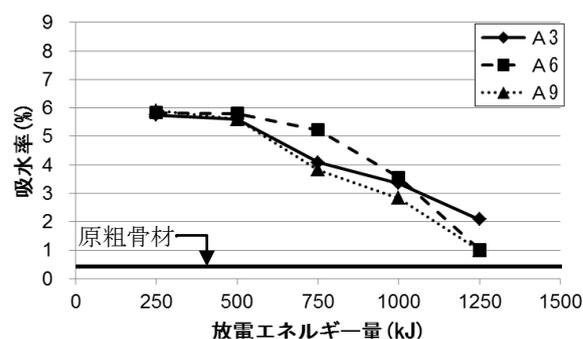


図-5 A3, A6, A9 の吸水率

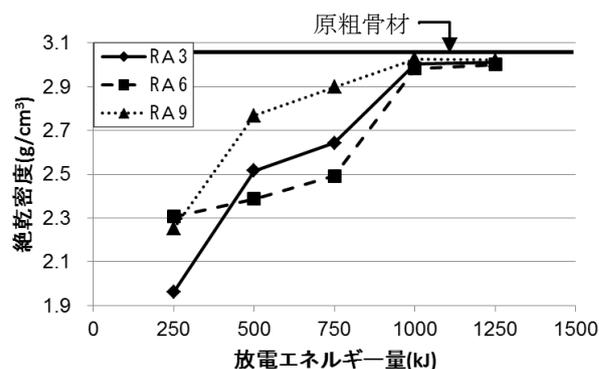


図-6 RA3, RA6, RA9 の絶乾密度

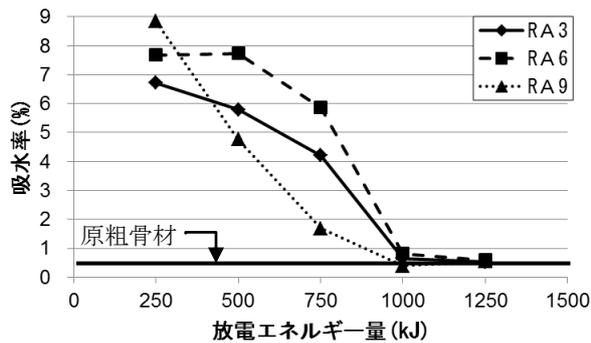


図-7 RA3, RA6, RA9の吸水率

図-4, 図-5より放電エネルギー量の増加に伴い吸水率は低下し、絶乾密度は上昇していることが確認できる。放電エネルギー量を増加させたときの絶乾密度及び吸水率の傾きはA9が最も大きかった。これよりコンクリート内部の空気量が多いほど少ない放電エネルギー量で原粗骨材の品質に近づいていると考えられる。これは気体の絶縁破壊強度が小さいことから空隙を縫うように電流が走ることにより、空気量が多いほどコンクリート内部空隙の絶縁破壊による影響が大きく反映され、モルタル部が破砕されたことによるものと考えられる。

図-6, 図-7より、パルス放電を印加して回収された再生粗骨材は放電の序盤から急激に絶乾密度は上昇、吸水率は低下し、特にRA9に関しては絶乾密度、吸水率の品質の向上が顕著にみられ、回収される試料の放電前のコンクリートの空気量の多少が破砕の進行に影響を及ぼすことが確認された。また、コンクリート供試体に使用した細骨材の密度が低いすなわちモルタル部の密度が低い場合には、川砂を使用した場合と比較して少ない放電エネルギー量で再生粗骨材の品質が向上している様子が確認された。これにより表-3に示すような粗骨材、モルタル部の音響インピーダンスすなわち密度の差異が衝撃波によるモルタル部の剥離に影響することが示唆された。

## 2.4 粗粒率による破砕過程の観察

ふるい分け試験より得られた粗粒率を図-8, 図-9に示す。

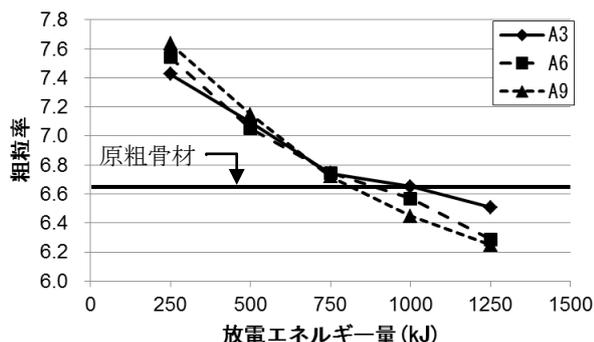


図-8 A3, A6, A9の粗粒率

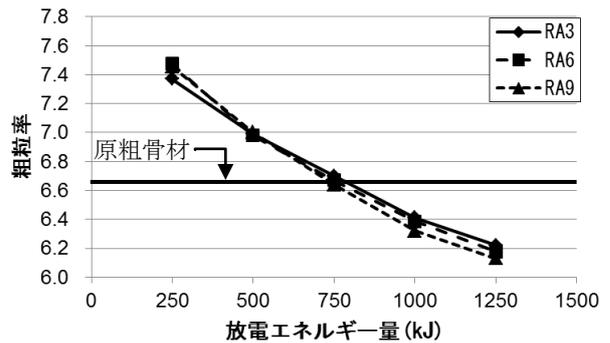


図-9 RA3, RA6, RA9の粗粒率

図-8より、放電エネルギー量の増加に伴う粗粒率の低下が確認された。そして、放電エネルギー量が750kJの時点では、各試料とも同じ程度の粗粒率でなおかつ原粗骨材に近い値をとるが、1000kJに達した時点で原粗骨材の粗粒率6.66より低下しており、各試料は細粒化している。また、各試料の粗粒率は放電エネルギー量の増加に伴う粗粒率の低下量は、A9, A6, A3の順に小さくなっており空気量の多少による影響が示唆された。

図-9より、粗粒率の変化の傾きに大きな差異は現れなかったため供試体内部の空気量の多少による影響は少ないと推測される。パルス放電を印加した際にコンクリート破砕における粗骨材表面からのモルタルの剥離現象は、内部空隙のプラズマ化によって発生した衝撃波によるもので剥離の進行具合は粗骨材とモルタル部それぞれの密度の差異によって決定されると考えられている。したがって、密度の低い再生細骨材を使用しているために供試体内部の空気量の多少に関わらず放電の初期段階で大部分のモルタルが粗骨材から剥離し、放電の印加回数を増やしていくことによって剥離したモルタルを破砕して細粒化していると考えられる。放電エネルギー量が750kJの時点で原粗骨材と同等の粗粒率となり、その後は空気量に関わらず様に細粒化していることから、メッシュに残るモルタルの破砕や粗骨材自体の破砕が起きており密度・吸水率試験結果からも回収試料の品質の向上はこれ以上見られないことが確認された。

## 3. 骨材種の違いが破砕に及ぼす影響の検討

### 3.1 供試体配合

骨材種の違いが破砕に及ぼす影響を検討するため、表-4のように使用する粗骨材は熊本県山鹿産の斑レイ岩、福岡県門司産の硬質砂岩、山口県下関産の安山岩の3種類とし、細骨材はすべての試体において熊本県山鹿産の川砂を使用して円柱コンクリート供試体(φ100×200mm)を各8本作製した。粒度分布は安山岩の粒度分布を基準とし、斑レイ岩、硬質砂岩のそれぞれもまたこの粒度と同じになるように粒度調整を行った。空気量は一定となるように混和剤によって調整した。作製したモ

ルタル供試体と骨材の音響インピーダンスを表-5 に示す。

表-4 使用骨材

	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)
斑レイ岩	2.99	0.63
硬質砂岩	2.73	0.47
安山岩	2.65	1.08
川砂	2.62	1.80

表-5 音響インピーダンス

	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	音響インピーダンス (kg/m <sup>2</sup> ・s)
モルタル (表乾)	2.19	8.53×10 <sup>6</sup>
モルタル (オーブンドライ)	1.95	6.05×10 <sup>6</sup>
斑レイ岩	2.99	2.02×10 <sup>7</sup>
硬質砂岩	2.73	1.68×10 <sup>7</sup>
安山岩	2.65	1.62×10 <sup>7</sup>

### 3.2 コンクリート破砕実験

3種類の粗骨材を使用した円柱コンクリート供試体を各8本作製し、破砕実験のパルス放電条件として放電1回あたりのエネルギー量を6.4kJに設定し、128kJに達する毎にその都度取り出し、総放電エネルギー量が896kJ(繰り返し放電回数140回)に達するまで繰り返し放電を行った。尚、今回の破砕実験では、1次処理としてパルス放電を10shot(64kJ)印加してから破砕を実施した。作製した8本の円柱供試体のうち4本は28日間の水中養生後に取り出した飽水状態で最初の放電を印加し、その後は内部空隙の影響が大きいと推測される回収試料の粗粒率が原粗骨材程度となるまで放電前に吸水させた。その後は気乾状態の試料にパルス放電を繰り返し印加した。そして、残りの4本は28日の水中養生後に乾燥器によって乾燥させ一定質量としたオーブンドライ状態にして最初の破砕実験を実施した。2回目の破砕実験からは気乾状態の試料に放電を印加した。尚、回収試料に関して原粗骨材に斑レイ岩を使用したものをG、硬質砂岩を使用したものをS、安山岩を使用したものをAと称する。また、はじめにオーブンドライにするものをd、吸水させた状態のものをsとして連ねて表記し、供試体の状態を表すものとする。

### 3.3 密度・吸水率試験による破砕過程の観察

密度・吸水率試験結果を図-10～図-15に示す。尚、各試験結果は円柱供試体4本の平均である。

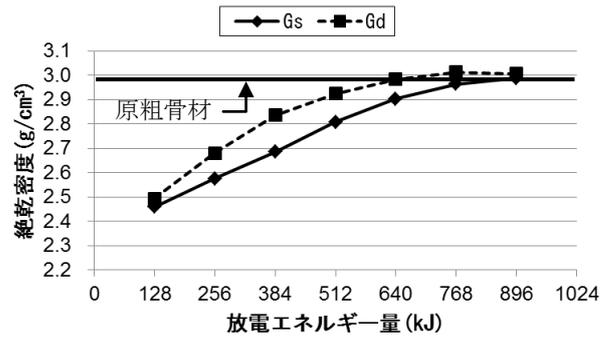


図-10 Gs, Gdの絶乾密度

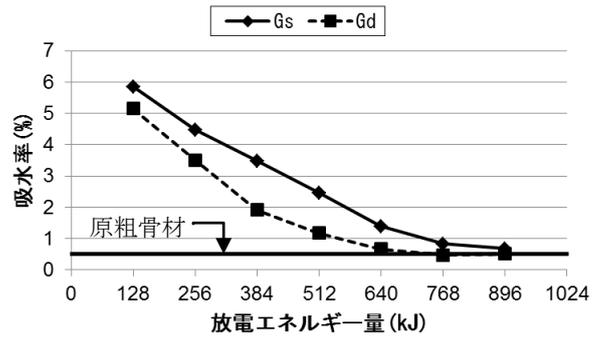


図-11 Gs, Gdの吸水率

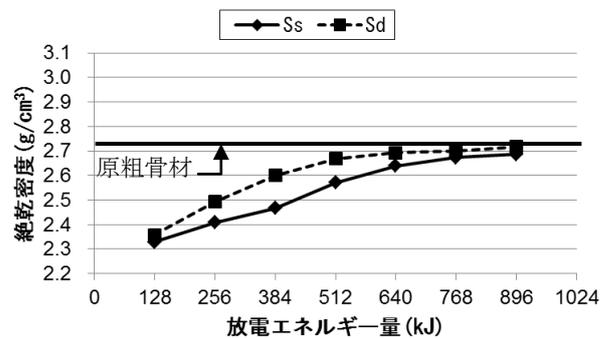


図-12 Ss, Sdの絶乾密度

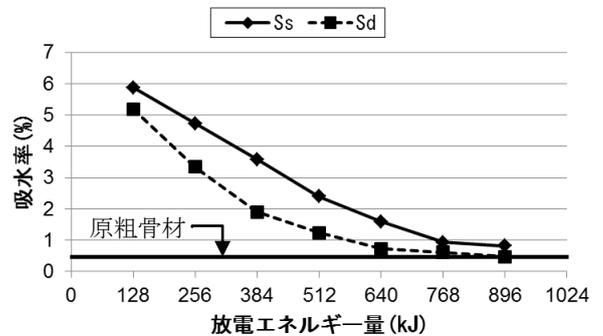


図-13 Ss, Sdの吸水率

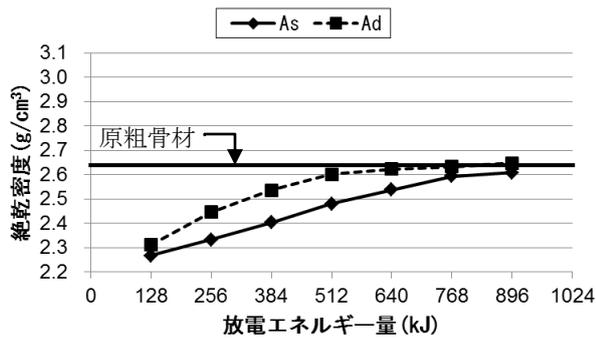


図-14 As, Ad の絶乾密度

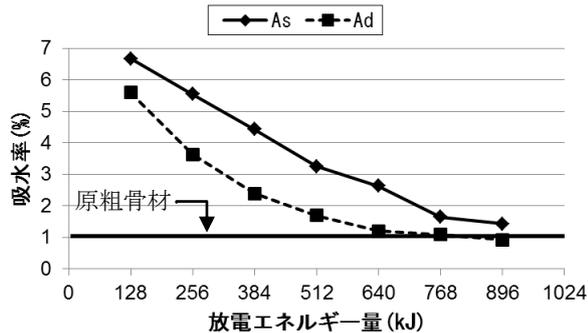


図-15 As, Ad の吸水率

いずれの骨材を使用した場合にも初期オープンドライ状態の試料は初期飽水状態の試料よりも明らかな品質の向上が確認された。初期オープンドライ状態の試料は、内部にほとんど水分を含んでおらず、液体よりも気体の方が絶縁破壊を起こしやすいという性質から初期オープンドライ状態にすることによって優先的にモルタルの破碎が進行して顕著な品質の向上が見られたと考えられる。特に、Gdは、放電エネルギー量が640kJの時点で原粗骨材と同等の品質となっており他と比較して早期にモルタルが剥離あるいは破碎されていることが確認された。この結果より粗骨材の密度が高い場合には、低い場合と比較して少ない放電エネルギー量で品質の向上を図ることができることが判明した。

### 3.4 粗粒率による破碎過程の観察

ふるい分け試験より得られた粗粒率を図-16、図-17に示す。放電初期においてAdの試料の粗粒率低下が顕著に見られた。この要因としては、放電初期においてモルタルの剥離が不十分であったことが考えられる。一方で、いずれの試料においても、初期オープンドライ状態では大きな差が見られなかった。その要因としては、乾燥状態にしたことから内部空隙に水分が少なくなっており内部空隙の絶縁破壊が起こりやすくなっていることが考えられる。これにより粗骨材とモルタルの密度の差異よりも内部空気量の影響が大きく、粗骨材からのモルタルの剥離現象よりも絶縁破壊によるモルタルの破碎現象が卓越して発生し、粗骨材の密度差による影響が見られなかったと推測される。

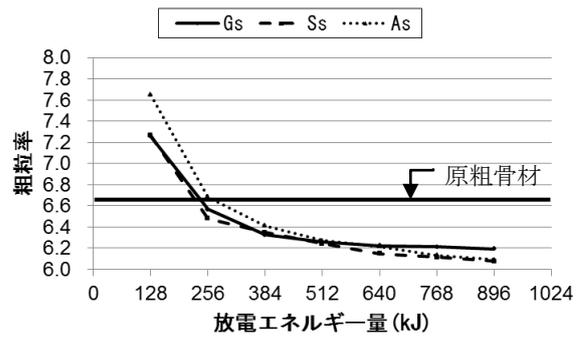


図-16 Gs, Ss, As の粗粒率

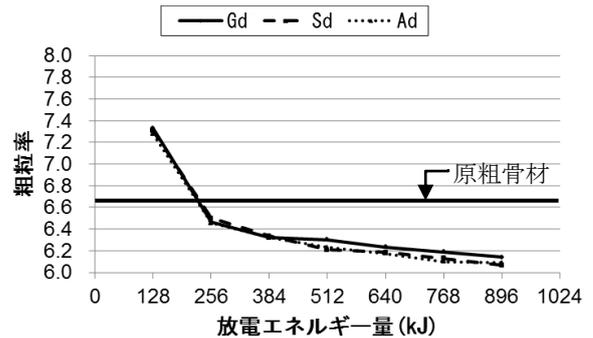


図-17 Gd, Sd, Ad の粗粒率

## 4. まとめ

- 1) コンクリート供試体内部の空気量が多いほど破碎過程で早期の細粒化が見られ、モルタルの密度が低いほど粗粒率には低下傾向が見られた。
- 2) 密度の低い再生細骨材を使用することで、剥離が早い段階で促されて細粒化し、少ない放電エネルギー量で品質の良い再生粗骨材の回収が可能であることが判明した。
- 3) どの骨材を使用した場合にも初期オープンドライ状態の試料は初期飽水状態の試料よりも明らかな絶乾密度、吸水率の向上が確認された。
- 4) 粗骨材の密度が高い場合には、少ない放電エネルギー量で品質の向上を図ることができる可能性が示唆された。

## 参考文献

- 1) 日本規格協会: JIS A 5021 コンクリート用再生骨材 H, 2011.5
- 2) 重石光弘, 浪平隆男ほか: 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, コンクリート工学年次論文集, vol.28, No.1, pp1475-1480, 2006
- 3) 高木基志, 重石光弘ほか: 「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」, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, 2008

## 謝辞

本研究は文部科学省グローバル COE プログラム「衝撃エネルギー工学グローバル先導拠点」の支援の下、JSPS 科研費 21510099, 24310058 の助成を受けて実施したものです。ここに感謝の意を表します。