

# 論文 モルタル部の性質がパルス放電法によるコンクリートの破砕過程に及ぼす影響

飯笹 真也\*1・重石 光弘\*2・石松 宏一\*3・浪平 隆男\*4

**要旨:** パルス放電法によるコンクリートの破砕はコンクリート中の気体の絶縁破壊, および同時に発生した衝撃波によって進展する。そこで, コンクリートのモルタル部の性質がパルス放電法によるコンクリート破砕過程に及ぼす影響を調べるために, 空気量の異なるコンクリートを破砕した。そして, 破砕過程をふるいわけ試験, 密度試験, 吸水率試験により観察した。その結果, 破砕過程における粗粒率の減少傾向より, 放電前半ではコンクリートの空気量が及ぼす影響が大きく, 放電後半ではモルタル部と粗骨材の音響インピーダンスの差が卓越することが判明した。

**キーワード:** 再生粗骨材, パルスパワー技術, リサイクル, 空気量, 音響インピーダンス

## 1. はじめに

近年, 高度経済成長期に建造された多くのコンクリート構造物が耐用年数を迎え, 都市の安全性を守る意味でも補修, 補強による延命化や更新の必要性が高まっている。また, その際には大量のコンクリート骨材が必要となる。しかし, 天然のコンクリート骨材は有限の資源であり, 良質なコンクリート骨材の供給が逼迫する事態になることも予想される。しかも, 廃コンクリートの排出量の増大に対する懸念もあり廃コンクリート塊より良質な骨材を回収する高度再生処理法の開発が推進されている。また, 再生骨材の品質規格として, JIS A 5021「コンクリート用再生骨材H」<sup>1)</sup>が規定され, 近年では, JIS A 5308<sup>2)</sup>が改正されて普通コンクリートおよび舗装コンクリートに再生骨材Hを使用できるようになった。このことから, 今後, 高品質再生骨材の需要が益々高まってくるものと考えられる。

そこで, 筆者らは「コンクリート内パルスパワー放電法」による高度骨材再生処理法を提案し, その実用化を進めている<sup>3)</sup>。コンクリート内パルスパワー放電によるコンクリート破砕は, コンクリート中の気体の絶縁破壊によるものである。絶縁破壊を生じた気体のプラズマ化により瞬間的な体積膨張が生じ, コンクリートの破砕が行われる。さらに, この瞬間的な体積膨張によって発生した衝撃波がコンクリート中を伝播し, モルタルの破砕, および骨材からのモルタルの剥離を誘発する。既往の研究において<sup>4)</sup>, このコンクリート内パルスパワー放電法によって高品質な再生粗骨材が回収可能であることを示した。また, この時, コンクリートの破砕過程を粗粒率の変化で表すと, コンクリートを破砕するのに使用し

た放電エネルギー量の増加に伴い, 図-1のような粗粒率の減少傾向が見られた。

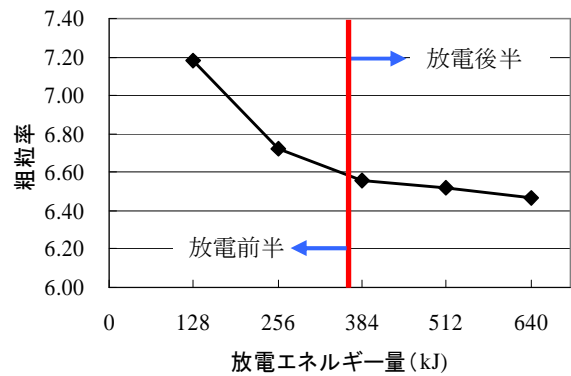


図-1 粗粒率

図-1において放電前半と放電後半では粗粒率の減少傾向に違いが見られる。コンクリート内パルスパワー放電法によるコンクリート破砕では, コンクリート中における空気を含む間隙が多く分布するモルタル部から破砕が先行して行われる。よって, 図-1における放電前半では, モルタルの破砕, および粗骨材からの付着モルタルの剥離が卓越し, 放電後半では粗骨材自体の破砕が卓越するものと推測される。そこで, 本研究では, この破砕現象のより詳細な検討を行うこととした。

## 2. パルス放電によるコンクリートの破砕

コンクリート内パルスパワー放電によるコンクリートの破砕過程は次のように説明される<sup>5)</sup>。

まず, 水中においてコンクリート内に高電圧パルス電流が流れると, コンクリート中に存在する物質の内, 絶縁破壊強度が最も低い気体から先行して絶縁破壊が生

\*1 国立大学法人熊本大学 大学院自然科学研究科 修(工) (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 工学部社会環境工学科 (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 博(工) (非会員)

じてプラズマ化する。これは、一般的に気体と固体と液体の誘電率および導電率を比較した場合、これらの中で気体が最も低く、固体が最も高いためである。したがってこの現象により、コンクリート中において空気を含む間隙が多く分布するモルタル部にひび割れが発生することになる。

また、絶縁破壊を生じた気体のプラズマ化による急激な体積膨張は衝撃波を発生し、周囲に伝播する。図-2のように、コンクリート破砕片に入射した衝撃波はさらに粗骨材とモルタルの境界面において、透過波と反射波に分かれる。このことから、粗骨材とモルタルの境界面で発生する引張力によってモルタルが粗骨材から剥離するようになる。この時発生する引張力は、モルタル部と粗骨材両者の音響インピーダンスの比に依存したものである。

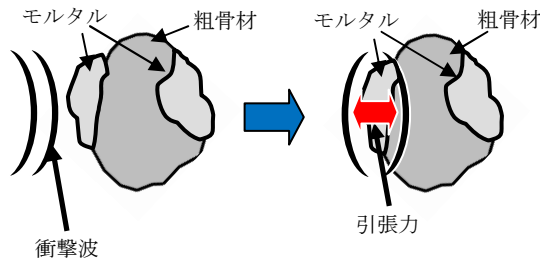


図-2 衝撃波によるモルタルの剥離現象

そこで、コンクリート内パルスパワー放電法によるコンクリート破砕では、コンクリート中におけるモルタル部の性質が大きな影響を及ぼすものと考えられる。放電処理前半におけるパルス放電のコンクリート破砕は内部空隙の絶縁破壊が卓越しておこるため、コンクリートの空気量が影響をおよぼすと考えられる。また、放電処理後半では絶縁破壊を生じた気体の瞬間的な体積膨張によって発生した衝撃波によるモルタルの剥離現象が卓越すると考えられる。

本研究では、これらのことを確かめるために、モルタル部に導入される空気量が異なるコンクリート供試体を作製し、コンクリート内パルスパワー放電法によって破砕をし、モルタル部の空気量、および音響インピーダンスの差異がこれらの破砕過程に及ぼす影響を、ふるい分け試験、密度試験、および吸水率試験より調べた。

### 3. コンクリート供試体について

#### 3.1 コンクリート供試体の配合

コンクリート中の空気量がコンクリート内パルスパワー放電法による破砕過程へ及ぼす影響を検討するために、コンクリート中における粗骨材、細骨材、およびセメントの体積を一定とした空気量の異なる3種類のコンクリート供試体を作製した。使用したセメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm<sup>3</sup>)である。また、使用した粗骨材は熊本県山鹿産の斑レイ岩、細骨材は熊本県山鹿産の川洗砂を使用した。それぞれの密度、吸水率、粗粒率を表-1に示す。

表-1 使用骨材

	絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率(%)	粗粒率
粗骨材	3.04	0.49	6.66
細骨材	2.58	3.07	2.49

コンクリート供試体の空気量は3%、6%、9%を目標とし、混入するAE剤の量により空気量の調節を行った。尚、使用したAE剤の主成分は特殊アニオン界面活性剤であり、10倍に希釈し使用した。示方配合を表-2に示す。以後、空気量3%の供試体をC3、空気量6%の供試体をC6、空気量9%の供試体をC9とする。

#### 3.2 コンクリート供試体の物理的性質

作製した3種類のコンクリート供試体の材齢28日において圧縮強度試験を行った。各供試体の圧縮強度、ヤング率、ポアソン比を表-3に示す。尚、圧縮試験はそれぞれの供試体において3回実施した。

圧縮強度はC3が最も高くなり、C9が最も低くなった。またヤング率およびポアソン比にも同様の傾向が見られ、空気量の多少が物理的性質に影響を及ぼした結果となっている。

表-3 コンクリート供試体の物理的性質

供試体	圧縮強度 (MPa)	ヤング率 (GPa)	ポアソン比
C3	32.5	18.4	0.22
C6	26.2	18.5	0.18
C9	23.5	17.9	0.16

表-2 コンクリート供試体の示方配合

供試体	粗骨材の最大寸法 (mm)	空気量 (実測値)	スラン プ (cm)	水セメ ント比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				AE 剤 (10倍希釈) (g/m <sup>3</sup> )
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
C3	20	3 (3.2)	8	55	44	175	318	742	1134	159
C6	20	6 (6.5)	8	55	44	174	318	742	1134	636
C9	20	9 (8.8)	8	55	44	174	318	742	1134	1113

#### 4. コンクリート破碎実験

コンクリート破碎実験に使用したパルス発生装置はマルクスバンク方式と呼ばれるものである<sup>6)</sup>。コンクリート破碎装置の仕組みを図-3に示す。水中に設置したコンクリート供試体に高電圧電極からパルス放電を繰り返し行うことにより、コンクリート供試体が次第に破碎されることとなる。ここで、図-3に示す低電圧電極は5mm角開口のステンレス製半球状メッシュとなっており、パルス放電により5mm程度以下に破碎されたものは水槽の底に沈積する。本研究ではこの5mm角開口のメッシュ上に留まった破砕片に対して各種試験を行った。

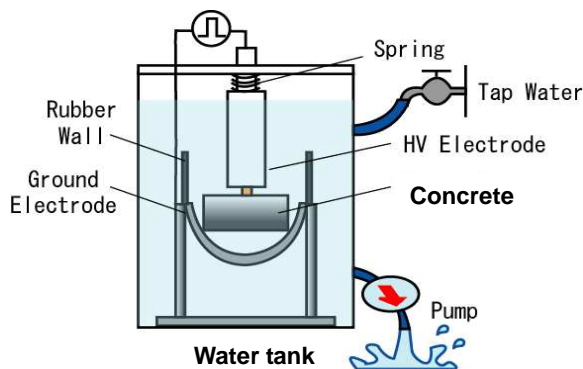


図-3 コンクリート破碎装置

尚、破碎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1.6kJに設定し、総放電エネルギー量が1250kJ(繰り返し放電回数782回)に至るまで繰り返し放電を行った。

#### 5. パルス放電によるコンクリートの破碎過程の観察

##### 5.1 ふるいわけ試験による観察

コンクリート内パルスパワー放電法によるコンクリートの破碎過程を調べるために、放電エネルギー250kJ(繰り返し放電回数157回)、500kJ(同314回)、750kJ(同417回)、1000kJ(同628回)、1250kJ(同781回)の時にふるいわけ試験を行った。その結果を図-4、図-5、および図-6に示す。尚、結果は各試料4回のふるいわけ試験の平均である。尚、以後、供試体C3から回収された試料をA3、供試体C6から回収された試料をA6、供試体C9から回収された試料をA9と称する。

図-4、図-5、および図-6より、各試料は放電エネルギーの増加に従って細粒化していることが分かる。全ての試料において放電エネルギー量が1000kJに達した以後は、原粗骨材よりも細粒化しており、骨材自体の破碎が生じたものと推測される。

ここで、それぞれの粒度分布に着目すると、放電エネルギー量が750kJに達した時点での粒度の差異はほとんど見られない。しかし、放電エネルギー量が750kJに達す

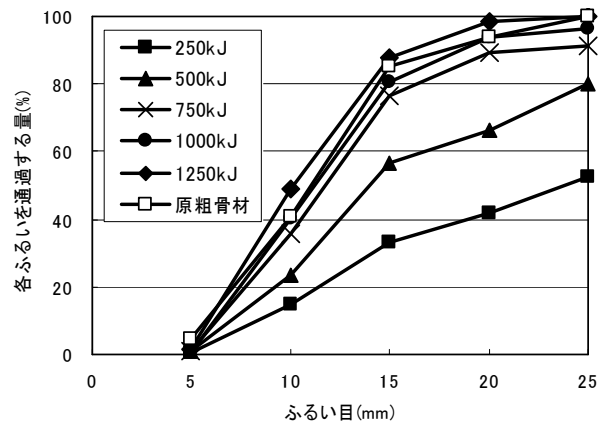


図-4 A3の粒度分布

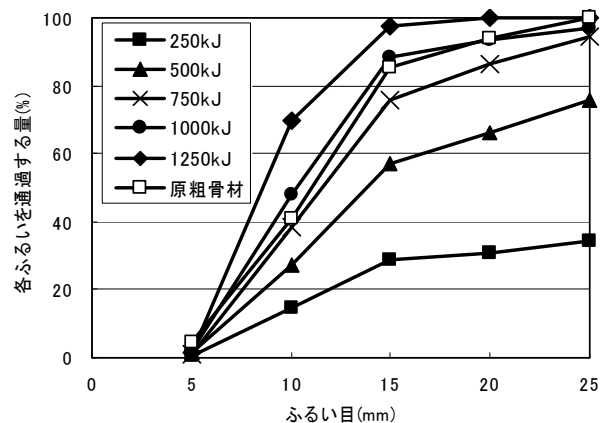


図-5 A6の粒度分布

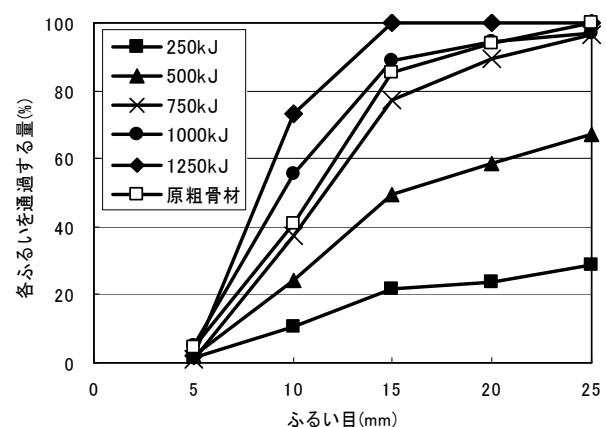


図-6 A9の粒度分布

るまでの破碎過程には違いが見られる。すなわち、モルタル部の空気量が多い供試体においては、25mm目ふるいに留まる大きなコンクリート片、およびモルタル片が多く含まれている。これは、モルタル部の空気量が少なければ、細かく破碎が進んでおり、一方モルタル部の空気量が多ければ、粗く破碎が進むことを示している。

いずれの供試体においてもほぼ同程度の粒度となった放電エネルギー量750kJに達した以降も試料間の粒度に違いが見られる。すなわち、A3は放電エネルギー量が750kJに達した以降においては大きな変化が見られず、パルス放電による破碎は終息したものと考えられる。一方、

A6とA9では、放電エネルギー量が750kJに達した以降も破砕が引き続き進行している。これらの試料は、空気量が6%、および9%とA3に比べ高いため、モルタル部の空気量も多いと思われる。つまり、モルタル部の破砕、および剥離がさらに進行したものと考えられる。また、パルス放電によりモルタル部が破砕された後もパルス放電を繰り返したことで、粗骨材内部で絶縁破壊が生じてしまい粗骨材が破壊された可能性も示唆される。

## 5.2 粗粒率による観察

パルス放電によるコンクリートの破砕過程を粗粒率の変化により示す（図-7）。

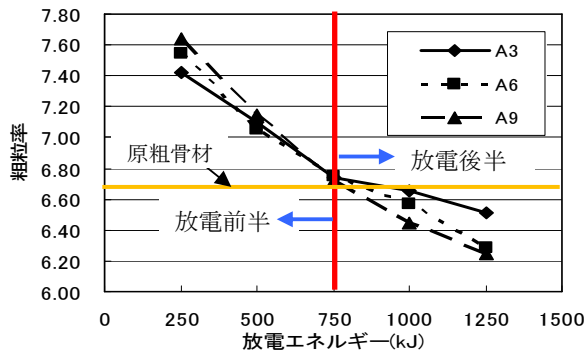


図-7 各供試体粗粒率

図-7より、各試料は放電エネルギー量の増加に伴って粒度の低下が確認された。また、各試料は放電エネルギー量が1000kJに達した時点において原粗骨材の粗粒率6.66よりも低下しており、細粒化した。

さらに、図-7の各試料の粗粒率において放電エネルギー量の増加に伴う粗粒率の減少率が異なることが分かる。これは、先の粒度分布による粒度の変化を反映したものとなっている。すなわち、図-7において放電エネルギー量が750kJに達した時点における各試料の粗粒率に着目するとこれを境に粗粒率の減少率に変化が見られる。

そこで、本研究では図-7に示す粗粒率において放電前半と放電後半における粗粒率に着目した。

まず、図-7における放電前半、の粗粒率の減少の割合は、各試料間において異なっていることに着目し、それを減少率というパラメータで定義した。減少率とは、放電エネルギー量250kJ毎の粗粒率の変化の割合であり式(1)で算出した。

$$\text{減少率} = -\frac{F.M_2 - F.M_1}{(E_2 - E_1)/250} \quad (1)$$

$F.M_1$ ：放電エネルギー量250kJの粗粒率、 $F.M_2$ ：放電エネルギー量750kJの粗粒率、 $E_1$ ：250kJ、 $E_2$ ：750kJ

表-4に各試料の減少率、およびA3の減少率を1とした各試料の減少率の比を示す。また、各供試体空気量と破砕値の減少率の比の関係を調べたものを図-8に示

す。A9の減少率が最も大きく、A3の減少率が最も小さくなっている。モルタル部の空気量が多いほど減少率が大きくなった。つまり、放電前半ではモルタル部の破砕が卓越していると思われる。そして、図-8より、空気量と粗粒率の減少率には相関性が見られ、放電前半における破砕現象にはコンクリートの空気量が影響を及ぼしていることが確認された。

表-4 放電前半の各試料の粗粒率の減少率

試料	A3	A6	A9
粗粒率の減少率	0.34	0.40	0.46
粗粒率の減少率の比	1	1.17	1.34

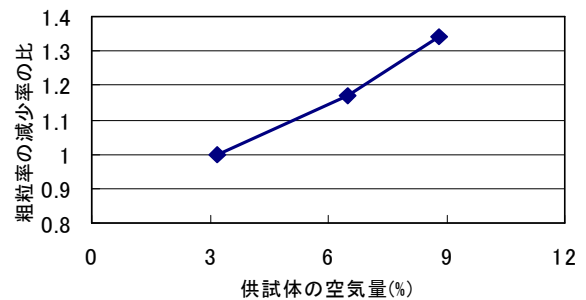


図-8 放電前半の粗粒率の減少率と空気量の関係

しかしながら、放電エネルギー量250kJの粗粒率に着目するとA3が最も小さくなっている。この要因としては、パルスパワーによるコンクリートの絶縁破壊の様相がコンクリート内部の空隙分布に依存するためと考えられる。すなわち、モルタル部の空気量が多い場合は、高電圧電極に近い空隙部での絶縁破壊が容易に起こるものと考えられ、コンクリート表面からの破砕が徐々に進行すると考えられる。一方、モルタル部の空気量が少ない場合、コンクリート表面付近ではなくコンクリート内部で絶縁破壊が起こり、コンクリート供試体が大きく破砕されると考えられる。

次に、表-5に放電後半の各試料の粗粒率の減少率を示す。尚、減少率を求める際は、式(1)において、 $F.M_1$ ：放電エネルギー量750kJの粗粒率、 $F.M_2$ ：放電エネルギー量1250kJの粗粒率、 $E_1$ ：750kJ、 $E_2$ ：1250kJとした。

表-5 放電後半の各試料の粗粒率の減少率

	A3	A6	A9
粗粒率の減少率	0.12	0.23	0.24
粗粒率の減少率の比	1	1.95	2.01

表-5より放電前半に比べ粗粒率の減少率は低下していることが分かる。そして、放電後半における破砕現象では、粗骨材からのモルタルの剥離が卓越すると考えられている。パルス放電による粗骨材からのモルタルの剥離



は絶縁破壊を生じた気体の瞬間的な体積膨張で発生した衝撃波がコンクリート中を伝播し、粗骨材とモルタルの界面において反射し、その際に発生する引張応力により誘発される。衝撃波の透過率は粗骨材とそれに付着しているモルタル部の音響インピーダンスの差によって決定される。そこで、モルタル部と粗骨材の音響インピーダンスを式(2)を用いて算出した。

$$Z = \rho \times V_p \quad (2)$$

Z: 音響インピーダンス(Ns/m<sup>3</sup>) V<sub>p</sub>: 縦波速度(m/s) ρ: 密度(g/cm<sup>3</sup>)

また、衝撃波の透過率は、式(3)により定義される。尚、ここで示す透過率は衝撃波の粗骨材への透過率である。

$$\text{衝撃波の透過率} = \frac{Z_m}{Z_a} \quad (3)$$

Z<sub>m</sub>: モルタルの音響インピーダンス

Z<sub>a</sub>: 粗骨材の音響インピーダンス

モルタル部の密度および縦波速度を計測するために、空気量を3%, 6%, 9%に調整したモルタル供試体を作成し、見かけの密度および縦波速度を計測した。斑レイ岩の縦波速度V<sub>p</sub>は一般的に6500~7000m/sとされており<sup>7)</sup>、粗骨材の音響インピーダンスを算出する際はV<sub>p</sub>=6850 m/sを使用した。各モルタル供試体と原粗骨材の密度、縦波速度、および音響インピーダンスを表-6に示す。

表-6 モルタル供試体物性値

供試体	C3-M	C6-M	C9-M	原粗骨材
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.95	1.87	1.83	3.06
縦波速度(m/s)	3132	3086	2969	6850
音響インピーダンス(Ns/m <sup>3</sup> )	6.09 × 10 <sup>6</sup>	5.72 × 10 <sup>6</sup>	5.42 × 10 <sup>6</sup>	2.07 × 10 <sup>7</sup>

また、表-6に示した各供試体と粗骨材の音響インピーダンスより、衝撃波の透過率を算出した(表-7)。

表-7 各モルタル供試体における透過率

供試体	C3-M	C6-M	C9-M
透過率	0.294	0.276	0.261

さらに、衝撃波の透過率と粗粒率の減少率の関係を調べたものを図-9に示す。

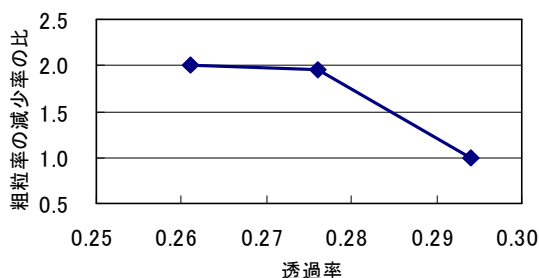


図-9 衝撃波の透過率と粗粒率の関係

図-9より衝撃波の透過率が小さくなると、粗粒率の減少率は大きくなった。衝撃波の透過率の低下は引張応力の増加を示す。よって、衝撃波の透過率と粗粒率の減少率には関係があると言える。また表-7に示した各供試体における衝撃波の透過率に着目すると大きな差は見られなかった。しかし、粗粒率の減少率には差が見られたため、モルタル部と粗骨材の境界面での衝撃波の透過率の違いが放電後半におけるパルス放電の破碎過程に影響を及ぼすものと考えられる。

### 5.3 密度および吸水率による観察

各試料の密度および吸水率を調べるために、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密度試験、および吸水率試験を行った。密度試験結果を図-10、吸水率試験結果を図-11に示す。尚、結果は各試料4回の試験の平均である。

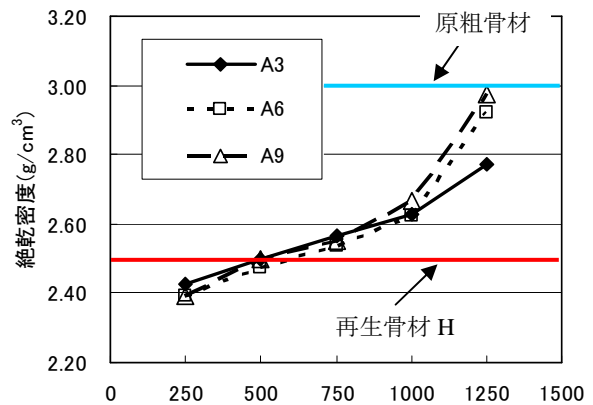


図-10 絶対乾密度の変化

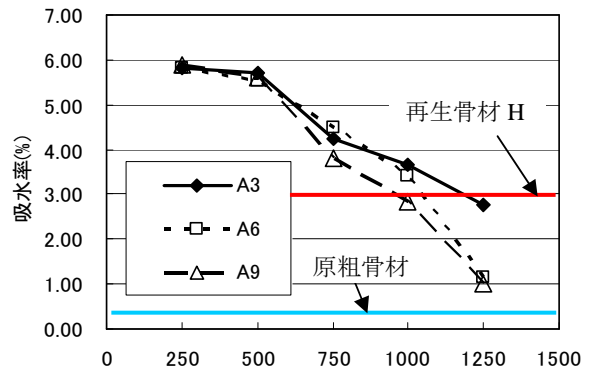


図-11 吸水率の変化

図-10および図-11より、全ての試料は放電エネルギー量の増加に伴い、絶対乾密度は上昇し、吸水率は低下した。これは、放電エネルギー量の増加に伴い、破碎が進行しモルタルが剥離していくためである。尚、各試料において再生骨材Hの品質規格を満たすために必要となった放電エネルギー量は、A3とA6は放電エネルギー量が1250kJに達した時点で絶対乾密度、吸水率ともに満たした。またA9は放電エネルギー量が1000kJに達した時点においてそれぞれ満たした。

ここで、図-10に示す各試料の絶乾密度に着目すると、全ての試料の絶乾密度は放電エネルギー量が1000kJに達するまではほぼ同じ値を示した。しかし、放電エネルギー量が1250kJに達した時点における絶乾密度に着目するとA3の密度に比べA6およびA9の絶乾密度は大きく上昇した。これは、モルタルが、破砕および剥離したためである。

一方、A3の絶乾密度がこれらに比べ低いのは、まだモルタル部が残っていたためである。これは、粗粒率による観察において前述した通り、A3におけるモルタル部と粗骨材の音響インピーダンスの差異が小さいため、衝撃波による付着モルタルの剥離が進行しにくかったためと考えられる。粗骨材から剥離はしたが、5mm以上のモルタル片となり試料に混入したため密度が上昇したと考えられる。しかし、前述したふるいわけ試験結果より放電エネルギー量が1000kJに達した時点で原粗骨材よりも細粒化していた。よって、放電エネルギー量が1000kJに達した以降においては、モルタルの剥離と共に粗骨材自体が破壊され、損傷を受け、絶乾密度の低下が起きたと考えられる。

また、図-11に示す吸水率に着目すると、A9は放電エネルギー量が750kJに達した以降は大きく低下し、放電エネルギー量が1250kJに達した時には原粗骨材と同程度の値となった。一方、A3とA6は放電エネルギー量が1000kJに達するまでは同様の傾向を示しているが、放電エネルギー量が1250kJに達するとA6はA9と同程度まで吸水率が低下した。よって、吸水率試験結果からも放電エネルギー量が1000kJに達した時点においてモルタル片がほとんど剥離し、放電エネルギー量が1250kJに達した時点においてはモルタルの剥離と共に粗骨材自体が破壊されていると考えられる。

## 6. まとめ

「コンクリート内パルスパワー放電法」によるコンクリート破砕は、コンクリート中の気体の絶縁破壊によるものである。既往の研究では、コンクリートの破砕過程を粗粒率の変化で表すと、放電前半と後半では破砕現象が異なっていることが指摘されていた。パルス放電によるコンクリート破砕は気体の絶縁破壊、およびモルタルと粗骨材の境界面での衝撃波の反射によるものであるため、本研究では、コンクリートの破砕過程にはモルタル部の性質が影響を及ぼすと考えた。そこで、空気量の異なるコンクリートを破砕し、ふるいわけ試験、密度試験、吸水率試験から破砕過程を調べた。以下に今回の実験で得られた結果を示す。

- (1) 初期の放電段階を除けば、空気量が多いコンクリート供試体ほどパルス放電による破砕の進行が早いことが分かった。
- (2) 放電前半では、コンクリート中の気体の絶縁破壊が

卓越するため、コンクリート供試体の空気量が多いほど、破砕の進行が早くなった。

- (3) 放電後半では、衝撃波の反射により発生した引張応力によって付着モルタルが剥離する。そして、モルタルと粗骨材の境界面における衝撃波の透過率が小さいほどモルタルの剥離の進行は早くなった。
- (4) 空気量 3%と 6%の供試体から回収された再生粗骨試料は、放電エネルギー量が 1250kJ に達した時点で再生粗骨材 H の品質規格を満たした。一方、空気量 9%の供試体から回収された再生粗骨材試料は放電エネルギー量が 1000kJ に達した時点において再生粗骨材 H の品質規格を満たした。

以上より、コンクリート内パルスパワー放電法によるコンクリートの破砕過程において、モルタル部の性質が影響を及ぼすことが確認された。

しかし、今回の実験におけるモルタル部の性質の違いとは空気量のみを変化させた場合を示している。よって、コンクリートに使用する細骨材の種類を変化させた場合におけるコンクリートの破砕過程への影響を検証する必要がある。また、今回の実験ではパルス放電のパラメータは一定にしてコンクリートの破砕を行ったが、放電パラメータを変化させると破砕過程も変化すると考えられるため、放電パラメータを変化させた場合における検証も行う必要がある。

尚、この研究は「文部科学省科学研究費補助金」および「熊本大学衝撃エネルギー工学グローバルCOE」による研究助成を受け実施したものである。

## 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, 2005.3
- 2) 日本工業標準調査会：JIS A 5308 「レディーミクストコンクリート」, 2009
- 3) 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.
- 4) 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
- 5) 秋山秀典：高電圧パルスパワー工学, オーム社, pp.36-38, 2003.12
- 6) 秋山秀典：高電圧パルスパワー工学, オーム社, p.95, 2003.12
- 7) Rolf Meissner : The Crust of the Earth, Springer New York, p.109, 2006.4