

(24) 放電衝撃破砕工法の衝撃特性に関する検討

Study of Impact Characteristics by Using Electric Discharge Impulse Crushing System

佐々木加津也*, 北嶋秀昭*, 阪本良*, 飯塚信二*, 田中幹雄*, 久保田士郎**, 佐分利禎**, 緒方雄二**
Katsuya Sasaki, Hideaki Kitajima, Ryo Sakamoto, Shinji Iizuka, Mikio Tanaka, Siro Kubota, Tei Saburi, Yuji Ogata

*日立造船株式会社 海洋防災ソリューション統括部(〒559-8559 大阪市住之江区南港北 1-7-89)

**工博, 産業技術総合研究所 爆破安全研究コア(〒305-8569 茨城県つくば市小野川 16-1)

Key Word: (*Electric Discharge Impulse Crushing Method, Crushing technology, Concrete, Rock*
キーワード: 放電衝撃破砕工法, 破砕技術, コンクリート, 岩石

1. 緒言

岩盤やコンクリート構造物の破砕, あるいはトンネル等の掘削手段として古くから火薬類による発破工法, 重機類, あるいは静的破砕剤などが使用されてきた。発破工法は, 火薬類を用いて瞬間的に大きな衝撃力を発生させて破砕するものであり, 安価で強力な破砕力を有するので広く普及してきた。一方で爆発物に対する安全性の問題から, 火薬類の製造, 輸送, 保管および使用について, 日本国内では火薬類取締法に基づいて有資格者による厳格な安全管理が必要とされている。また, 火薬類の使用に対して施工現場近隣住民の理解を得ることは非常に難しく, 日本国内の市街地では事実上使用できない状況である。重機類による施工は, 発破工法の様な法規制等を受けず, 比較的容易に使用することが可能である。しかしながら, 破砕効率が低く, 周辺への振動や騒音など環境面の問題を有している。また, 狭隘部や地盤の不安定な箇所では機械の搬入が制約されることがあり, 効率的な破砕が困難である。静的破砕剤は安全性などで優れる点があるものの, 反応に時間を要するため作業効率は低いことが課題としてあげられる。

さらに近年では, コンクリート構造物を単純に解体するだけではなく, 部分的な破砕によってリニューアルする案件が増加しつつあり, 部分破砕後の残存部への影響を制御できる高度な制御破砕工法が望まれている。

以上のような観点から火薬類に近い破砕力を有しつつ, 環境に優しく制御性の高い工法として実用化したものが放電衝撃破砕工法である¹⁾²⁾。本工法は, これまでに数 10 件の施工で用いられてきた。本工法による施工システムは, 最大 6000V で放電が可能である放電衝撃発生装置, 直径がφ10mm ないし 30mm で長さが 50mm ないし 100mm の放電カートリッジ, およびこれらを接続する 20m ないし 200m のケーブルで構成される。放電衝撃発生装

置のコンデンサに充電された電気エネルギーは電子スイッチを介して放電カートリッジに供給されると, その際に生じる一連の反応によって火薬類に近い衝撃力を発生して対象物を破砕することができる。本工法はトンネルや深礎の掘削, 転石の破砕除去工事, あるいは鉄筋コンクリート構造物の解体などにおいて, 火薬類の使用が困難な現場, 狭隘な箇所, あるいは制御破砕が必要な箇所に適用され, その有効性が発揮されている³⁾。本工法の特徴をまとめると以下の通りである。

- (1) 放電カートリッジは, 電気条件と衝撃力発生について最適設計された金属細線と非火薬類の自己反応性液が封入されたものであり, 取扱いが容易かつ安全性が高く, 使用に関して火薬類取締法による規制を受けない。
- (2) 放電の制御に電子スイッチを用いるため μs オーダーの斉発精度を実現でき, 高精度な制御破砕で対象物を計画的に破砕することができる。
- (3) プレーカ等の重機類に比べて, 低騒音かつ低振動で効率的に破砕することが可能である。
- (4) 放電ケーブルは放電衝撃発生装置から最大 200m まで延長可能なため, 高所や狭隘部など広範囲で使用することが可能である。

本報では, 放電衝撃破砕工法の衝撃特性に関する検討結果について述べる。

2. 放電衝撃破砕工法の基本特性

2.1 基本メカニズム

図-1 に放電衝撃破砕システムの概念を示す。放電衝撃発生装置は, 商用の交流を昇圧して直流に変換し, コンデンサに 1500V ないし 6000V で充電する。コンデンサ

に蓄えられた電気エネルギーは半導体電子スイッチを介して放電カートリッジに供給される。放電カートリッジは破砕孔に装填が容易なカプセル形状であり、電気エネルギーを供給するために一对のリード線を有している。リード線の先端は金属細線で結合されており、自己反応性液と共にカートリッジに封入されている。放電カートリッジに放電衝撃発生装置から電気エネルギーが供給されると金属細線がごく短時間で急速に熔融気化することで金属細線周囲に高温・高圧が生じる。この作用により、カートリッジ内の自己反応性液が燃焼し、Gpaオーダーの衝撃圧を発生して対象物を破砕する。なお放電衝撃破砕工法で使用する自己反応性液は、起爆および伝爆が極めて困難な液体であり、通常の輸送や取扱いは爆発しない安全性が高い物質である。

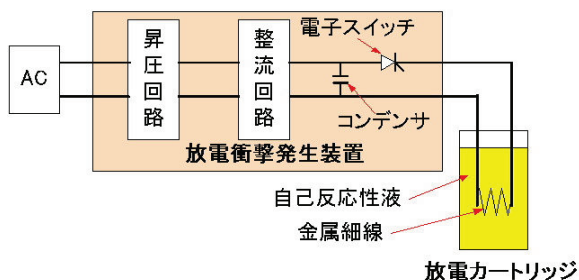


図-1 放電衝撃破砕システム構成

カートリッジより発生する衝撃力は封入される自己反応性液量で制御可能である。破砕対象物の寸法や強度特性に応じて適正に液量で使用される。しかしながら、自己反応性液の燃焼範囲は金属細線近傍に限られており、現状のカートリッジ容量は2ccから25ccで標準化している。また、放電電圧1500Vで十分な破砕力を発生させることができるが、放電電圧を3000Vにすることで3本のカートリッジを並列接続して使用することが可能であり、さらに放電電圧6000Vでは6本のカートリッジを並列に接続することができ、作業性を向上させることが可能である。

破砕対象物の強度特性などによるが、通常は削孔深さ300mmないし500mm、削孔ピッチ300mmないし500mmで使用するが多い。



施工前



削孔



カートリッジ装填



結線



飛散防止養生



破砕後

図-3 施工フロー

2.2 システム構成と施工例

図-2 に放電衝撃発生装置の使用例を示す。最新の放電衝撃発生装置は小型軽量化を進め、高圧部、制御部および操作部を分割した構造とし、輸送性と操作性を向上させた。

図-3 は一般的な施工フローを示したものである。放電衝撃破砕工法は、削孔、カートリッジ装填、タンピング、結線、飛散防止養生を行った後に放電衝撃発生装置から放電を行うことで対象物を破砕することができる。

これまでに、環境対応が重視される市街地での鉄筋コンクリート構造物の破砕、高精度な制御破砕が要求されるリニューアル工事、重機で施工困難な高所の落石防護工、火薬類の使用が困難な箇所な箇所での施工などに適用して効果をあげている⁴⁾。



図-2 放電衝撃発生装置

3. 衝撃特性実験

放電衝撃破砕工法を効率的かつ安全に使用するためには、破砕過程の可視化および衝撃圧の計測を実施した。

表-1 に衝撃特性を把握する実験に使用した装置および供試体を示す。圧力測定は火薬類の爆轟圧計測などに用いられるピエゾフィルムゲージを使用し、破砕過程の可視化には最大で $1\mu\text{s}$ ピッチの撮影が可能な高速ビデオカメラを使用した。なお、放電衝撃破砕システムは実施工で使用されているものである。

表-1 実験装置と供試体

項目	仕様
高速度ビデオカメラ	島津製作所製 HPV-1 (撮影速度 1Mfps)
放電衝撃破砕システム	日立造船製 ESG7K2 (放電電圧 0~6000V)
圧力測定治具	SUS304 $\phi 120\text{mm}/\phi 20\text{mm}\times\text{H}70\text{mm}$
破砕実験供試体	PMMA 角柱 $100\text{mm}\times 100\text{mm}\times 100\text{mm}$ (引張強度 78.5MPa)
ピエゾフィルムゲージ	Dynasen 製 PVF2-11-.125-EK

図 4 に圧力測定実験用治具を示す。衝撃力によって破損しない肉厚の SUS304 製円筒内に放電カートリッジを装填し、その直下にアクリル樹脂 (PMMA) を介してピエゾフィルム、さらにその下に反射波の干渉を減らすための PMMA ブロックを設置した。上下はフランジで固定されている。

図-5 は圧力波形の計測結果を示したものである。図中の時間 $0\mu\text{s}$ は放電カートリッジへの電力供給開始時であり、約 $120\mu\text{s}$ より圧力波形が立ち上がって小さなピークが観察される。このピーク圧は放電により放電カートリッジ内の金属細線が短時間で気化したことにより生じた圧力と考えられる。その後、約 $270\mu\text{s}$ に 1GPa 超の最大圧が計測されており、カートリッジ内の自己反応性液が燃焼反応を起こした結果と考えられる。

図-6 は放電衝撃破砕と含水爆薬の圧力を比較したものである。含水爆薬は数 μs で 4GPa 以上の爆轟による超高圧が発生するが、放電衝撃破砕では爆轟が生じないため急峻な衝撃波は発生せず、緩やかな圧力上昇を示すことが確認された。

図-7 は PMMA ブロックの破砕過程を高速度ビデオカメラで撮影した結果を示したものである。高速ビデオカメラ画像は $32\mu\text{s}$ 毎のものであり、中心より周囲に向かって亀裂が進展している様子が確認される。画像より亀裂の進展速度は 500m/s 程度であり、PMMA の弾性波速度 (約 2500m/s) より十分に遅いことから、亀裂に高压の自己反応性液燃焼ガスが流入することで破砕が進行していると考えられる。

図-8 は破砕後の PMMA 破片の状態を示したものである。

破砕片のカートリッジ装填孔近傍は、火薬類を用いた破砕で見られるような圧砕された形跡が見られず、引張破壊的に破砕されていることが確認される。

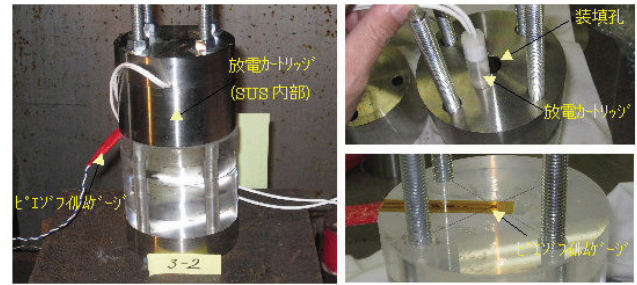


図-4 圧力計測治具

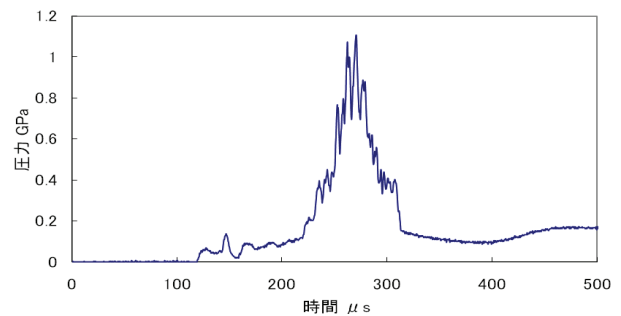


図-5 放電破砕の圧力波形

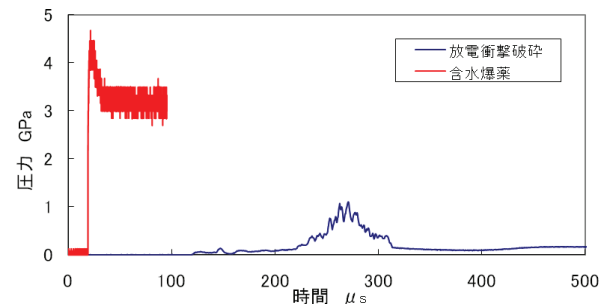


図-6 放電衝撃破砕と爆薬の圧力波形の比較

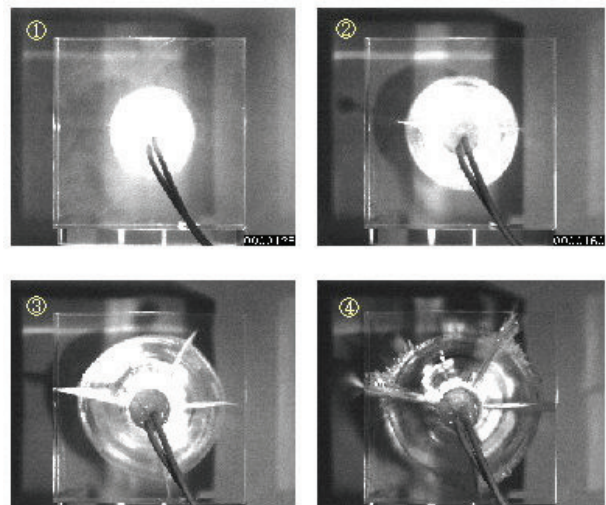


図-7 PMMA の破砕過程 ($32\mu\text{s}$ ピッチで撮影)

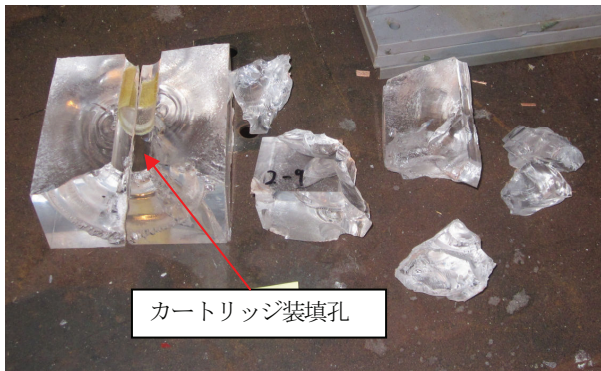


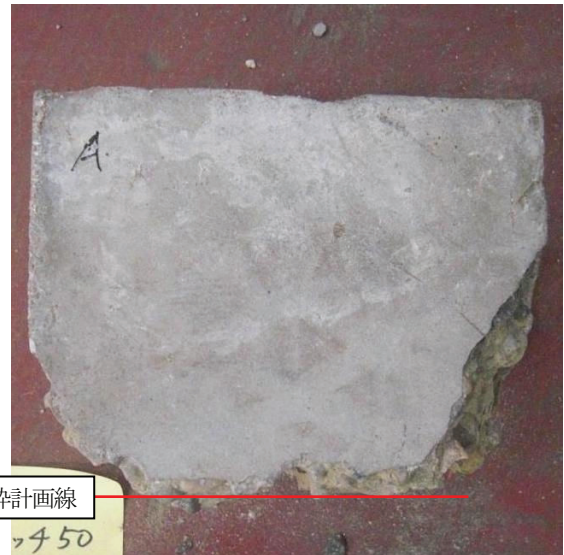
図-8 PMMA の破碎片

図-9 はコンクリートブロックを 3 本の放電カートリッジを用いて制御破砕した結果を示したものである。コンクリートブロックは一辺 150mm の立方体である。抵抗線は 30mm であり、装填ピッチは 50mm である。使用した放電カートリッジは $\phi 10\text{mm}$ で長さが 80mm のものであり、全てのカートリッジを斉発した。破砕結果を観察すると、カートリッジ装填孔間を結ぶように破砕されており、制御が有効であることが確認される。放電衝撃破砕工法は電気エネルギーを半導体スイッチで制御して放電カートリッジへ供給するため、斉発誤差 μsec オーダーの誤差精度のため斉発性が優れており、このような制御破砕が実現できる。また、図 で示したように圧力の上昇速度が火薬類と比較して緩やかであるために、カートリッジ装填孔を圧碎することがない。破砕対象の残存側への損傷は極めて小さく、亀裂の生成は確認できなかった。

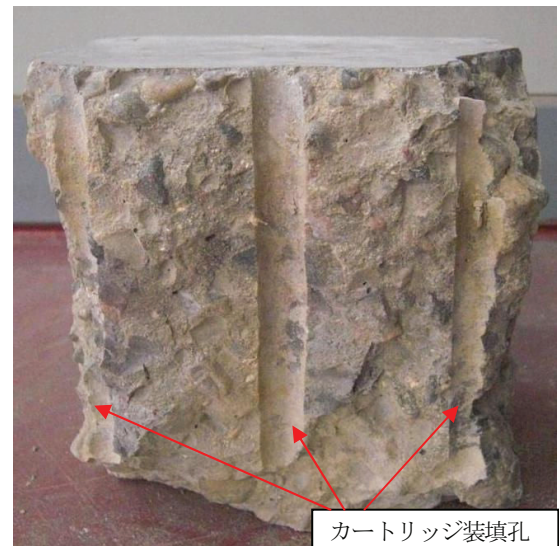
4. 結言

放電衝撃破砕工法の衝撃特性に関する検討を行い、以下に示す知見が得られた。

- (1) 放電衝撃破砕の圧力は、電力供給開始後約 $120\mu\text{s}$ より圧力波形が立ち上がって小さなピークが観察され、約 $270\mu\text{s}$ に 1GPa 超の最大圧が計測される
- (2) 放電衝撃破砕は含水爆薬の圧力と比較すると、爆薬のような爆轟現象が見られず、放電衝撃破砕の圧力上昇は緩やかである。
- (3) 放電衝撃破砕は圧力上昇が緩やかなため、装填孔を破損することなく、装填孔から引張破壊的に破砕していることが確認された。



(上面側)



(破砕面)

図-9 コンクリート制御破砕結果

参考文献

- 1) 荒井浩成ほか、放電衝撃破砕技術の開発、日立造船技報 Vol.58 No.3 1997, p15-21
- 2) 前畑英彦ほか、放電衝撃力発生装置およびその用途開発、日立造船技報 Vol.60 No.2 1999, p30-37
- 3) 北嶋秀昭ほか、放電衝撃破砕工法とその施工例、建設機械 2005 9, 39-44
- 4) 佐々木加津也ほか、放電衝撃破砕工法の特性と施工例、Hitz 技報 Vol71 No.1 2010, p32-37