

# プラズマによる破碎技術の開発

北原成郎・垣内幸雄・藤原一博

近年、土木工事も都市化に伴う住宅地や近接構造物等の騒音・振動など周辺環境に与える影響対策が最も重要な問題となってきた。今回、こうした背景より「純粋に電気だけで岩を割る」ことに注目し、プラズマによる岩盤破碎技術（PAB：Plasma Acoustic Blasting）を開発した。本技術は電源から充電器を介してコンデンサに蓄積したエネルギーを対象物体内に挿入した電極棒の先端で一気に放電させることによってプラズマを生成し、その時に発生する衝撃波により岩を破碎するものである。

キーワード：放電破碎，プラズマ，解体，衝撃波，岩盤掘削

## 1. はじめに

放電による衝撃でものを破碎する考え方は、古くは1960年代から特許出願などで見ることができる。落雷の激しい衝撃からもその効果が容易に想像できるが、放電だけで破碎する技術はこれまで十分に効果を発揮するものがなかった。

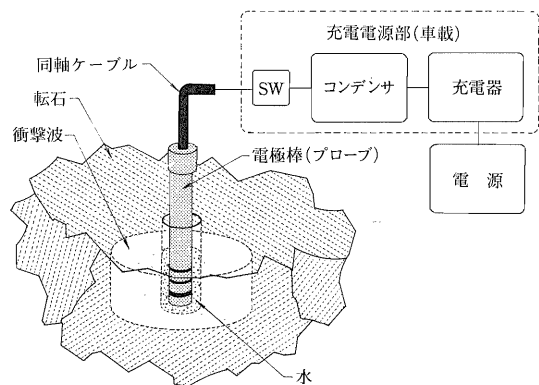
開発の動機は、一軸圧縮強度が100 MPaを超える岩盤などでは、大型ブレーカの破碎機械の効率が著しく低下し、装置の損耗が激しいことから、これに替わる工法を検討したことから始まる。また近年、火薬を使用できない現場が増えてきており、新たな掘削技術を要求する声が高まっていた。

こうした状況の中で高出力レーザや電磁波などの最近の新しい技術を検討した結果、機構が簡単に制御しやすい放電破碎技術を開発することに決定し、開発を進めてきた。

## 2. 工法の概要

本技術は電源から充電器を介してコンデンサに蓄積したエネルギーを対象物体内に挿入した電極棒の先端で一気に放電させることによってプラズマを生成し、その時に発生する衝撃波により岩を破碎するものである（図—1参照）。

電気エネルギーのみを利用し、化学物質や金属などの反応に頼らないことがこれまでの放電技術と異なる点であり、騒音、振動が少なく破片の飛



図—1 技術概要図

散が無いこと、また、電圧を調整することにより破碎力を調整することができるため、重要構造物の近傍でも施工できること、などが特徴である。

また使用する電極は繰返し利用できる固定電極であるため、破碎状況に応じて繰返し同じ孔で放電することができるため、必要以上に対象物を破壊することが少ない。

## 3. 装置概要

本装置の構成要素は、充電電源部と電極棒（プローブ）およびそれらを接続するケーブルである。

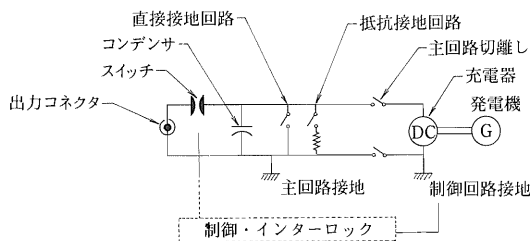
### (1) 充電電源部全体構成

充電電源部の仕様を表—1に、基本回路を図—2に示す。

これらは充電器、接地回路、制御・インタロ

表—1 電源装置仕様

項目	主要諸元
外形寸法	L2.6×W1.4×H1.7 m
質量	3 ton
コンデンサ容量	2 mF
定格電圧	22 kV
定格エネルギー	480 kJ
定格ピーク電流	300 kA
必要電源	25 kVA



図—2 基本回路図

ク回路、コンデンサ、スイッチ、出力コネクタなどで構成する放電回路である。充電部全体のインダクタンスはエネルギー効率を重視して $0.5 \mu\text{H}$ と極めて小さい値になっている。

## (2) 充電器

充電器には軽量、コンパクトなインバータ式を用いている。容量が $12 \text{ kW}$ であるため、 $300 \text{ kJ}$ の充電時間は約25秒になる。

電源は3相 $200 \text{ V}$ 、 $25 \text{ kVA}$ の一般的な屋外工事用ディーゼル発電機を用いている。

## (3) 接地回路

抵抗接地回路は、充電後何らかの理由で放電を中止せざるを得なくなっても、安全にコンデンサのエネルギーを熱として放出させるためのものである。直接接地回路は、さらに安全を期するために設けられた回路であり、充電中と放電時以外は常に閉じることによってエネルギーが残留しないようになっている。

## (4) コンデンサおよびスイッチ

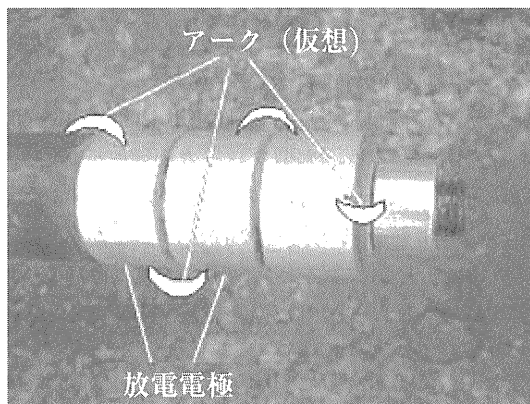
1個の容量が $333 \mu\text{F}$ の直流コンデンサを6個並列に接続しており、全体の蓄電容量は $2 \text{ mF}$ である。単位体積当たりの蓄積エネルギーが非常に大きいため、6個積重ねても $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$ 程度にしかない。

スイッチには平板大気圧ギャップ式を採用した。平行に配置された平板を空圧アクチュエータで駆動して距離を縮めると、ある間隔になったところで自発的にギャップ間に放電を起し、出力コネクタへと電流が流れる仕組みである。

## (5) 電極棒（プローブ）

プローブはインピーダンスの低減と構造的強度を確保するため同軸構造になっている。外部導体は放電時の衝撃に耐えうよう $5 \text{ mm}$ 厚の鉄製パイプである。

回路の特性として放電エネルギーが極大になる外部負荷抵抗値（放電抵抗値）が存在し、放電エネルギーの極大値は回路抵抗を小さくするほど大きくなる。そのため、充電電源部の抵抗値を小さくし、さらに写真—1に示すように、プローブ先端の放電部には複数のギャップを設けて放電抵抗が回路の最適値になるよう工夫した。



写真—1 プローブ先端

各ギャップ間での放電で複数個のアークが発生するようになったことと、エネルギー効率が向上したことの相乗効果で破砕力が飛躍的に増大した。プローブの長さは $1 \sim 2 \text{ m}$ 、外径は $50 \text{ mm}$ である。

## (6) ケーブル

ケーブルの断面図を図—3に示す。ケーブルには放電時に数百 $\text{kA}$ にも及ぶ大きな電流が流れるため、ケーブルの中心から外へ向かって強大な電磁力が作用する。その大きさは数十 $\text{MPa}$ （数百気圧）にも達するため、外縁部には強固な補強層を

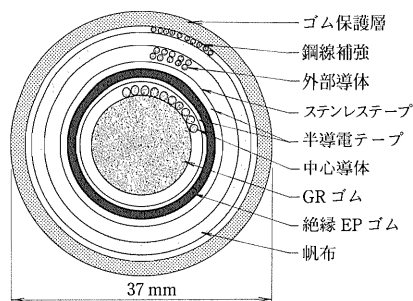


図-3 ケーブル断面図

設けているが、扱いやすさを考えて、柔軟性を重視した構造になっている。

また、電流が導体の表面にしか流れない特性を利用して、中心導体の中央部を中空にし、ゴムで置換えている。このことでエネルギーロスの低減とケーブルの柔軟性を同じに達成することができた。全長は約 30 m にしているが、同軸コネクタにより延長が可能である。

#### (7) 防音装置、ハンドリング

放電時の騒音を低減するために写真-2 に示すような防音装置をプローブに装着した。

これは防音シートを複数重ね合わせたもので、地表面の凹凸にも良く馴染み、騒音の低減に効果を発揮している。現状の騒音は、250 kJ で放電した場合、放電位置から 30 m の地点で 80 dB (A) 程度である。放電エネルギーが小さくなれば騒音値も低下する。

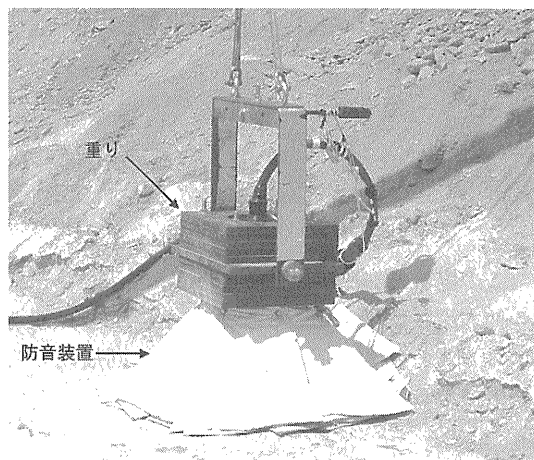


写真-2 防音装置

放電時には衝撃力の反作用でプローブが孔から抜け出ようとする。その対策として合計約 500 kg

の重さの鉄板を吊金具の部分につけている。

写真-3 は実現場での使用状況である。発電機と電源をユニック車に積載し、プローブはクレーンで吊り下げている。孔が鉛直の場合はこの方法で効率良くプローブを挿入することができる。



写真-3 現場作業状況

また、斜め、横向き、上向きの孔への対策として、新たに油圧式のマニピュレータを製作した(写真-4 参照)。



写真-4 油圧式マニピュレータ

#### 4. 岩破碎試験

岩破碎手順を図-4 に示す。破碎手順は次のようになる。

- 岩を削孔した後水を注入する。
- プローブを所定の深さまで挿入し、充電を開始する。

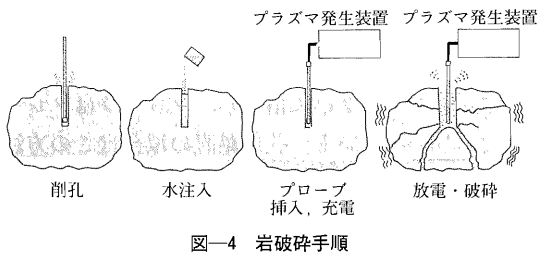


図-4 岩破碎手順

- ・所定のエネルギーを蓄積した後放電し、岩を破碎する。

### (1) 転石破碎試験

破碎に使用した供試体は兵庫県赤穂市採取の一軸圧縮強度 150~240 MPa の流紋岩で、大きさは約 0.2~4.0 m<sup>3</sup> である。あらかじめ、深さが供試体高さの半分程度で径が 75 mm の孔を削孔面のほぼ中央に設けた。

破碎後の形態には典型的なパターンがあり、孔底を頂点とした円錐形の破片と、孔を中心に 3~4 分割された破片に分かれることが多い。破碎後の状況を写真-5 に示す。



写真-5 破碎後の転石

図-5 に転石破碎に要したエネルギーを示す。点線は今回投入したエネルギーの最低値が転石の体積に比例することを示している。このことから、転石を破碎する場合には体積に応じて必要な

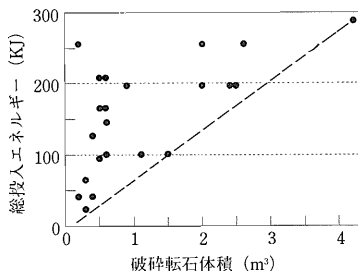


図-5 転石破碎結果

最小エネルギー値を予測できるのではないかと考えている。このケースでは、1 m<sup>3</sup> あたりの必要最小エネルギーは約 70 kJ ということになる。

さらに、これまでの実験結果から、1 回あたりのエネルギーを変化させて放電を行っても、破碎に必要な累積エネルギーはほとんど一定であることが明らかになっている。

発生したひび割れによって孔内に水が貯まりにくい場合には増粘剤（食品添加物）を使用し、粘性を高めることで漏洩を防いでいる。これ以外に塩水や泥水などを用いた場合でも破碎効果は水とほとんど変わらない。

### (2) ベンチカット破碎試験

試験場にてベンチカット破碎を行っている。この場合の削孔ピッチは 700 mm で、プローブの挿入深さは 500 mm である。1 回当たりの放電エネルギーが 256 kJ で 1 孔あたり 3 回放電した。

### (3) 岩盤破碎試験

平面的な広がりを持つ岩盤上で破碎実験を行った時の破碎状況を写真-6 に示す。

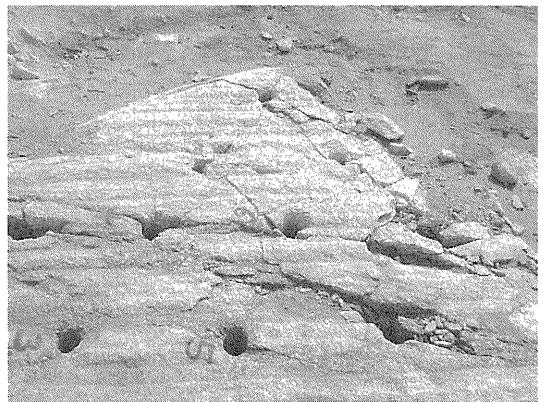


写真-6 岩盤破碎状況

この場合の削孔ピッチは 500 mm で、プローブの挿入深さは 500 mm である。1 回当たりの放電エネルギーが 400 kJ で 1 孔あたり 3 回放電した結果である。

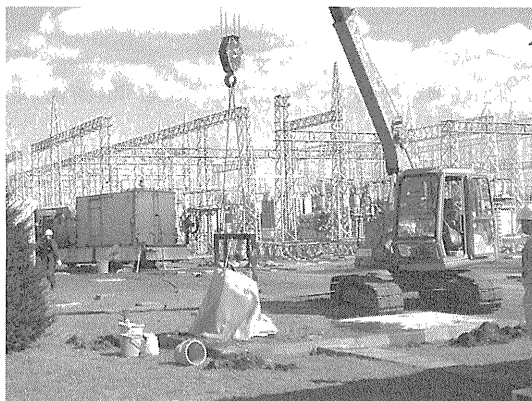
## 5. 実施工例

平成 13 年 5 月より実施工への導入を開始した。以下の例は、コンクリート構造物への適用事例で

ある。

### (1) 変電所内鉄塔基礎解体工事

既設の鉄塔撤去に伴い(写真—7参照),その基礎部コンクリートを60基,PAB工法にて,破碎した。施工箇所は変電所周辺民家から20m程度と近接しており,ブレーカなどの騒音発生となる工法は使用できない状況であった。



写真—7 施工状況

当初静的破碎剤で施工予定であったが,鉄筋等の拘束により穿孔ピッチを細かくしても破碎が難しく,効率が悪いなど問題があった。この施工では,1m<sup>3</sup>程度の基礎に1孔~3孔程度コアカットで削孔し,放電破碎した。100~150kJの放電により,バックホウのバケットやコンクリート破碎機でつかめる程度にクラックを入れ,支障なく破碎した(写真—8参照)。



写真—8 破碎状況

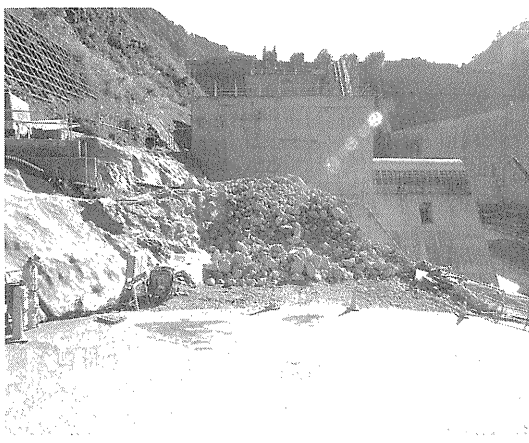
### (2) ダム排水用インクライン解体工事

一般的な鉄筋コンクリート構造物の解体工法の

新しいひとつのメニューとして確立するために,ダム下流にある排水用インクライン基礎をPABにて解体した(写真—9,写真—10参照)。



写真—9 インクライン基礎全景



写真—10 インクライン解体状況

### (3) ケーブルクレーン基礎解体工事

近接して人家があるため,騒音を低減する目的でPABを導入した。約60cm間隔で約2m程度



写真—11 ケーブルクレーン基礎解体工事

穿孔し、放電破碎した(写真-11 参照)。鉄筋とコンクリートのはく離が見られ、鉄筋の分別が容易に行えた。

#### (4) 造成工事転石破碎工事

造成現場に出土した花崗岩の転石の破碎を行った(写真-12 参照)。表面は風化した花崗岩も芯部は新鮮な状態で 20 m<sup>3</sup> の転石に約 7,000 kJ の放電エネルギーを投入した。



写真-12 転石破碎状況

## 6. ま と め

火薬やブレーカなどこれまである破碎技術を適用できない現場が数多くあり、それらには経済的な破碎工法がない。

本工法の実用化開始から約半年を経過し、様々な対象物を破碎してきたことにより、それらに対して、放電破碎技術が有効な手段の一つになる可能性を見出せたと考える。

今後は、衝撃力の増加や耐久性の向上を図るとともにさらに多くの対象物への適用を試みていき

たい。課題としては、

- ① 発生する衝撃波の測定,
- ② 衝撃波発生メカニズムの解明,
- ③ 物質へ伝達された応力波の解析,

が挙げられる。今後はこれらの研究を進めて新たな破碎技術を確立するよう努力していきたい。

本工法に用いた装置は、株式会社熊谷組、奥村組土木興業株式会社、住友電気工業株式会社 3 社の共同開発である。

#### 《参考文献》

畑 良輔ほか：プラズマ岩石破碎装置の開発，電気評論，平成 13 年 5 月号

藤原一博ほか：高電圧放電による岩破碎技術の開発，第 56 回土木学会年次講演会Ⅲ-B 137

J C M A

#### 〔筆者紹介〕



北原 成郎(きたはら しげお)  
株式会社熊谷組  
土木本部  
機材部



垣内 幸雄(かきうち ゆきお)  
株式会社熊谷組  
土木本部  
トンネル技術部



藤原 一博(ふじわら かずひろ)  
奥村組土木興業株式会社  
環境開発事業本部  
技術部