

15. プラズマによる破碎技術（PAB工法）の開発

(株)熊谷組：*北原 成郎、垣内 幸雄

1. はじめに

近年、土木工事も都市化に伴い、住宅や近接構造物等の周辺環境に与える騒音・振動が、大きな問題となってきた。そのため、発破工法は使用できず、大型掘削（切削）機械を採用しても中硬岩地山では掘削能力に限界が有り、難渋する事が多い。

硬岩破碎技術は、自由断面掘削機や大型ブレーカの発達で掘削能力が大幅に向かっているが、発破工法と比較すると80～100MPa以上の一軸圧縮強度を持つ硬岩では、潜在的なクラックが少ない場合などを除き、著しく掘削効率が低下する。ビット先端のチップやチゼルの性能が限界に近づいていて、これ以上、性能を大きく向上させることは難しい状況であることから、新しい破碎工法が求められている。

これまでの機械掘削とは異なる破碎技術を検討した結果、放電により発生する衝撃波を利用して非接触で対象物を破碎することができる本技術が将来性があると判断し、研究開発を進めてきた。こうした背景より『水と電気だけで岩を割る』ことに注目し、環境に優しいプラズマによる岩盤破碎技術（P A B : Plasma Acoustic Blasting）を開発した。

以下本報では、本システムの概要と試験結果及び実施工事例について報告する。

2. 技術概要

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等を破碎するものである（図-1）。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る。また、騒音、振動が少なく破片の飛散が無いことや、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など、重要構造物の近傍でも施工できることが特徴である。また使用する電極は繰り返し利用できる固定電極により、破碎状況に応じて繰り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。

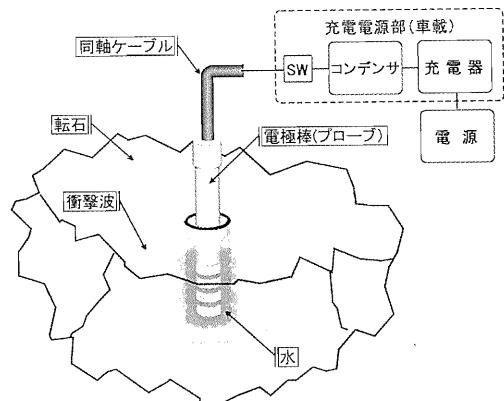


図-1 技術概要図

作業は図-2に示すように、以下の手順を繰り返す。

- ①始めに削岩機等で電極より一回り大きい削孔径の孔を削孔する。通常は事前に施工しておく。
- ②水を孔に注入する。クラック等で水が溜まらない場合はゲル化液を入れる。
- ③電極（プローブ）を孔に挿入し、充電を開始する。充電時間は1分以内。
- ④充電が終了したら、放電を行い、破碎する。

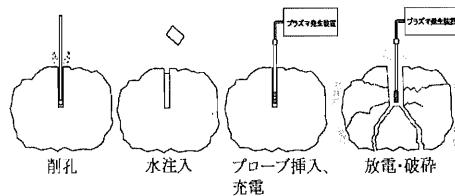


図-2 岩破碎手順

3. 装置概要

本装置の構成要素は、主に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から成る。図-3には、全体システムの概略を示し、以下、個々の構成要素について説明する。

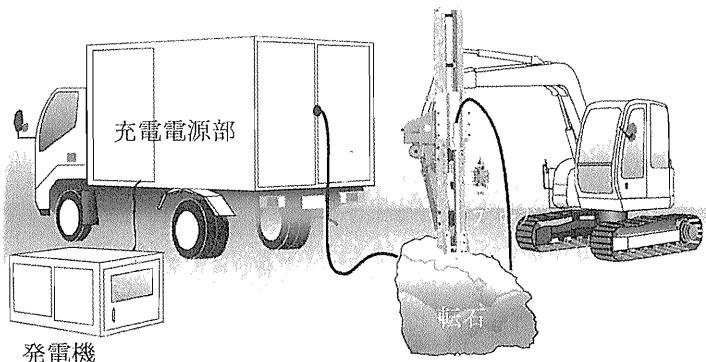


図-3 プラズマ破碎システム概

(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-4に示す。これらは充電器、接地回路、制御・インターロック回路、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 $0.5\mu H$ と極めて小さい値になっている。

全体の重量は約3tonであり、発電機とともに4tonトラックに積載可能である。

(2) 充電器

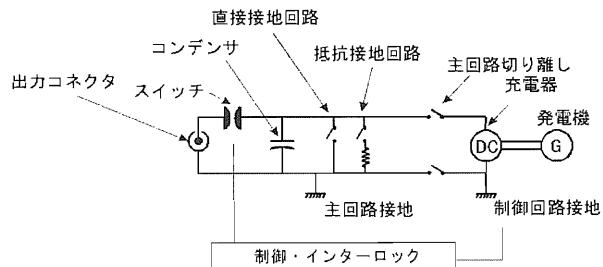
充電器には軽量、コンパクトなインバータ式を用いている。容量が12kWであるため、300kJの充電時間は約25秒になる。電源は3相200V、25kVAの一般的な屋外工事用ディーゼル発電機を用いている。

(3) コンデンサおよびスイッチ

1個の容量が $333\mu F$ 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2mFである。

表－1 電源装置仕様

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



図－4 基本回路図

スイッチ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ことでギャップ間に放電を起こし、出力コネクタへと電流が流れる仕組みである。

(4) 電極棒（プローブ）およびケーブル

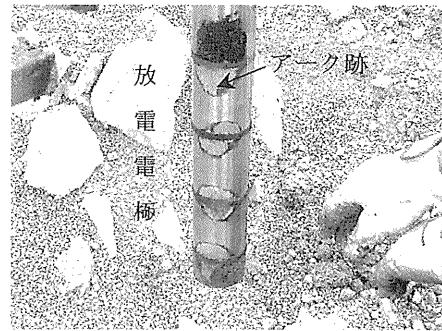
プローブはインピーダンスの低減と構造的強度を確保するため同軸構造になっている。外部導体は放電時の衝撃に耐えうるように鉄製パイプとした。写真－1に示すように、プローブ先端の放電部には複数のギャップを設けて放電抵抗が回路の最適値に近づくよう工夫している。各ギャップ間で放電が起こるため、複数個のアークが発生するようになったことと、エネルギー効率が向上したことの相乗効果で破碎力が飛躍的に増大した。プローブの長さは1.0 m～3.0m、外径は50mmと25mmの2種類がある。

ケーブルには放電時に数百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的な電磁力が作用する。その大きさは数十MPa（数百気圧）にも達するため、外縁部には強固な補強層を設けているが、扱い易さを考えて、柔軟性を重視した構造になっている。

全長は標準では約30mで、同軸コネクタにより延長が可能である。

(5) 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。現状の騒音は、250kJで放電した場合、放電位置から30mの地点で80dB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。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。その対策として約100～350kgの重さのカウンターウェイト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。



写真－1 放電後のアーク痕跡

(4連直列ギャップ)

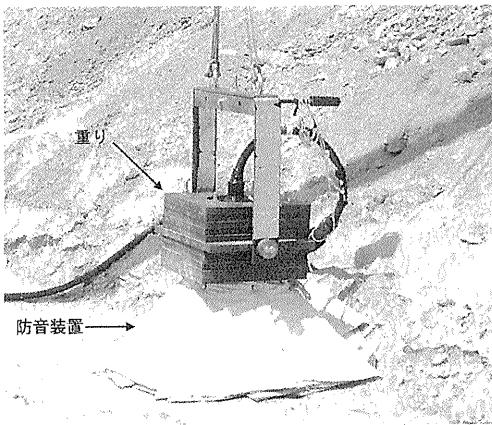


写真-2 防音装置



写真-3 現場作業状況

4. 岩破碎試験

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150～240MPaの流紋岩で、大きさは約0.2m³～4.0m³である。あらかじめ、深さが供試体高さの半分程度で径が75mm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。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、1m³あたりの必要最小エネルギーは約70kJ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水を防いでいる。

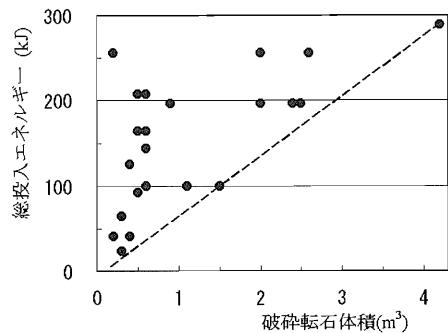


図-5 転石破碎結果

5. 実施工例

以下は平成13年5月より実施工への導入した実施工事例の一部を紹介する。

(1) 変電所内鉄塔基礎解体工事

既設の鉄塔撤去に伴い、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。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

も破碎が困難であり、効率が悪いなど問題があった。当該施工では、 $1m^3$ 程度の基礎に1孔～3孔程度コアカッターで削孔し、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-4 施工状況



写真-5 破碎状況

(2) 市街地での解体事例

騒音振動規制の厳しい市街地での事例を写真に示す。コンクリート基礎約 $60m^3$ を解体した。二次破碎はバックホウのバケットのみで行った。

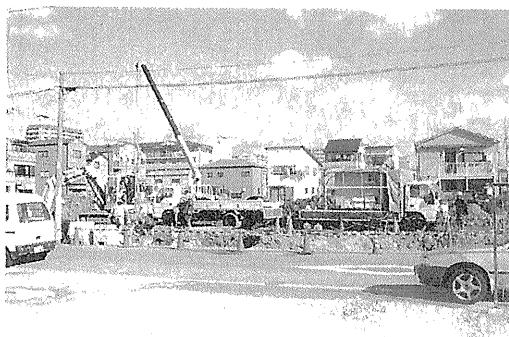


写真-6 市街地における作業状況



写真-7 放電後の解体状況

(3) 橋脚の解体事例 (写真-8、9)

市街地での新設の高架橋工事に伴う既設の橋脚解体工事である。

解体は上部のウイング不から基礎のフーチングまでPAB工法で放電破碎した。
二次破碎は使用機械が限定され、バックホウのバケットのみで行った。鉄筋量の多いコンクリート構造物も、放電によって内部のコンクリートも細かく粉碎する事ができた。

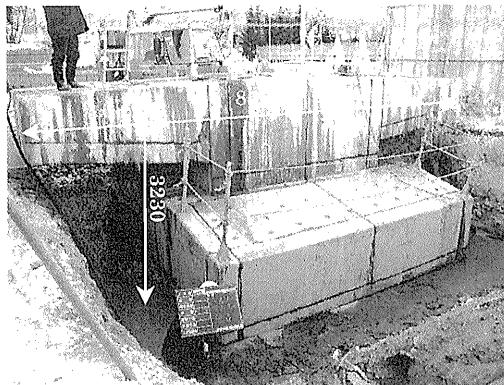


写真-8 解体前の橋脚



写真-9 解体時の作業状況

(4) 硬岩転石の破碎工事例

当工法の本来の開発目標である硬岩破碎事例を以下に示す。

写真-10、11は、住宅造成工事に伴う花崗岩の転石破碎事例である。花崗岩の目のない大きな転石は“しわく”（粘っこい）ブレーカでは破碎が困難であったが、PAB工法では容易に破碎できた。



写真-10 花崗岩破碎状



写真-11 花崗岩破碎状

6. まとめ

硬岩では 200MPa 以上の岩を放電のみで破碎することができた。また静的破碎剤では壊れにくい鉄筋コンクリート構造物に対しても効果があることが解ってきた。破碎時の飛石が少ないなどのメリットがあるがこれまでにない破碎方法であるため、その特徴を生かした破碎手順や工法の開発を見出すこと今後の課題である。今後更にシステム全体の合理化を図ると共に、立坑等の基礎掘削工事、都市地下土木工事、硬岩トンネルの無発破工法、構造物等の近接工事などに適用できるよう開発普及を図っていきたい。なお当工法は熊谷組、住友電工、奥村組土木興業の3社共同開発技術である。

最後に本工法の実施に対してご支援いただいた関係者の皆様にこの場を借りて感謝いたします。