

# プラズマによる破砕技術の研究開発

垣内幸雄\* 北原成郎\*\*

近年、土木工事では都市化等に伴い、住宅地や近接構造物等へ及ぼす騒音・振動の影響が重要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、難渋する事が多く、また振動・騒音も低減しない。今回、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砕技術（PAB: 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鉄筋コンクリート構造物の解体事例について報告する。

キーワード：プラズマ、放電、破砕、衝撃波

## 1. はじめに

トンネルなどでの硬岩掘削では火薬による発破工法が最も効率が良いが、安全性や周辺への影響が大きく使用が著しく制限される工事が増えている。また機械による硬岩掘削では岩盤強度が増加すると損耗が激しく経済性が低下、または掘削不能となる。今回、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砕技術（PAB: 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鉄筋コンクリート構造物の解体事例について報告する。

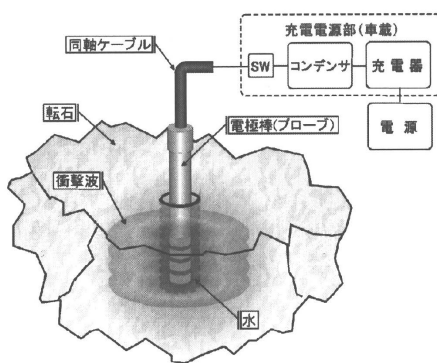


Fig. 1 技術概要図

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の対象物を破砕するものである。

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散が無いこと、また、電圧を調整することにより破砕力を調整することができるため、変電所や橋梁など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り返し利用できる固定電極であるため、破砕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。

作業は Fig. 2 に示すように、以下の手順を繰り返す。

- ①はじ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。

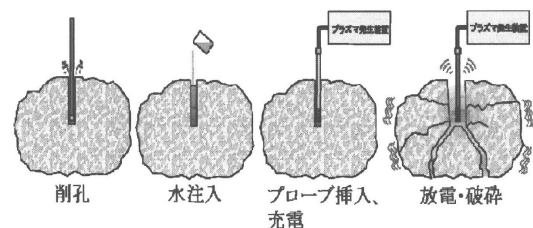


Fig. 2 岩破砕手順

## 2. 工法説明

### 2.1 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

- 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、破砕する。

### 2.2 破砕原理

放電により岩などの強固な対象物を破砕する原理は、放電によりアークが発生する場所に存在する物質がプラズマ化することで急激な膨張により発生する圧力波

\* 土木事業本部 トンネル技術部  
\*\* 土木事業本部 土木部 機材グループ

で起こる現象である。この工法での放電時間は、効率の良い回路設計のため、ほとんどの放電を完了するのに 200  $\mu$  sec 程度である。圧力の発生する時間は、放電時間にほぼ等しいと考えられる。

この圧力波が対象物に伝達し破砕するが、圧力波を伝達する上でも、またプラズマを発生させる点でも電極周辺に水が必要となる。穿孔が必要である理由は発生した圧力波を効率良く利用するためでもあり、水を保持するためでもある。

このように瞬時に高い圧力を発生させ破砕する方法は、静的な破砕たとえば油圧クサビや静的破砕剤などと異なる点の一つは、圧力波が自由面や音響インピーダンスの異なる境界面で反射し、引張応力を発生させる点にある。圧力の発生した点から離れた場所で破壊が起こったり、自由面に沿ってクラックが発生したり、コンクリート中の鉄筋、L型鋼の周辺が破砕するなどの特徴が見られる。

この現象は火薬の発破とほぼ同じであると思われるが、火薬と大きく異なる点は放電時の爆発現象が燃焼を伴わないため、発生するガス圧が火薬と比較するとかなり少ないと推定される。これは岩を破砕する際、ほとんど飛石が見られない点や水中での放電でも水面から深い場合、大きな水柱が立たない現象からも推測できる。

放電現象であるため、センサー等を近接させて実際に発生する圧力を測定することは難しくこれまで正確な圧力を測定できていない。効率の高い電極を製作する上でも必要であるが、高速度カメラでその波形を撮影することができた。(Photo. 1)

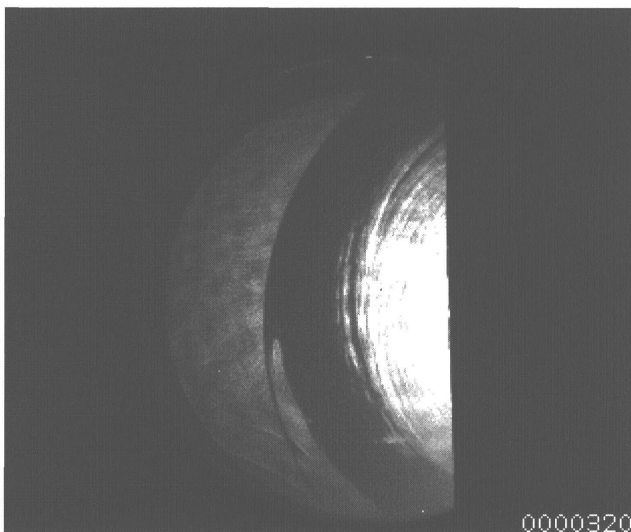


Photo. 1 プラズマによる衝撃波

### 3. 設備

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。Fig.

2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記述する。

#### 3.1 充電電源部全体構成

充電電源部の仕様を Table 1 に、基本回路を Fig. 3 に示す。これらは充電器、接地回路、制御・インタロック回路、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 と小さい値に抑さえるよう設計している。

Table 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

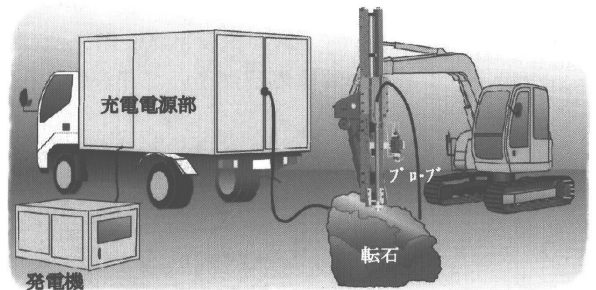


Fig. 3 プラズマ破砕システム概要

#### 3.2 充電器

充電器にはインバータ式を用いて交流 200V を直流に変換している。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 の一般的な工専用ディーゼル発電機を用いている。

#### 3.3 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。

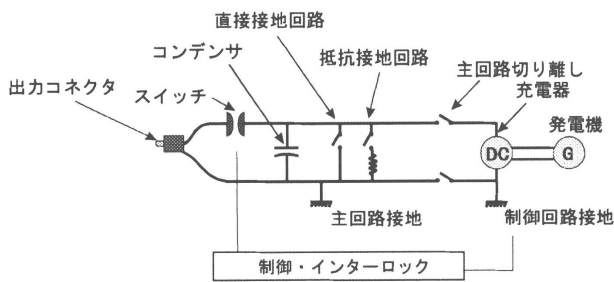


Fig. 4 パルス電源用回路

### 3.4 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ので、6個積み重ねても  $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.7\text{m}$  程度である。

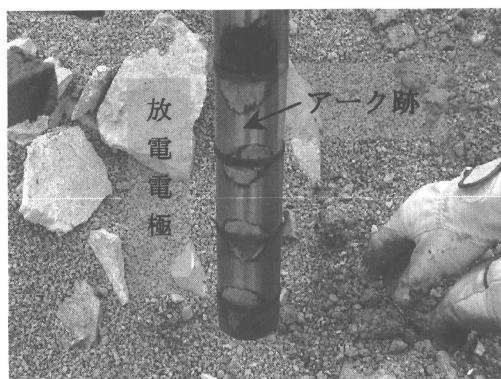
スイッチには平板大気圧ギャップ式を採用した。平行に配置された平板を空圧アクチュエータで駆動し間隔を狭めることで自動的にギャップ間に放電を起こし、出力コネクタへと電流が流れる仕組みである。

### 3.5 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耐衝撃性を考慮し鋼製パイプを用いている。

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 Photo. 2 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砕力が飛躍的に増大した。プローブの長さは  $1.0\text{m} \sim 3.0\text{m}$ 、外径は  $50\text{mm}$  と  $25\text{mm}$  の2種類がある。

Photo. 2 放電後のアーク痕跡  
(4連直列ギャップ)

### 3.6 ケーブル

ケーブルはプローブと同様、インピーダンス低減のため、同軸構造である。ケーブルの断面図を Fig. 5 に示す。

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。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、ゴムで置き換えている。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  $30\text{m}$  にしているが、同軸コネクタにより延長が可能である。

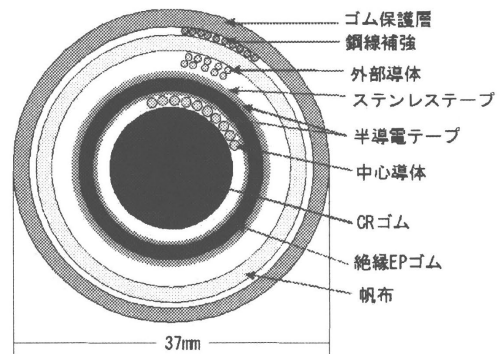


Fig. 5 耐圧ケーブル断面図

### 3.7 防音装置, ハンドリング

放電時の騒音を低減するために Photo. 3 に示すような

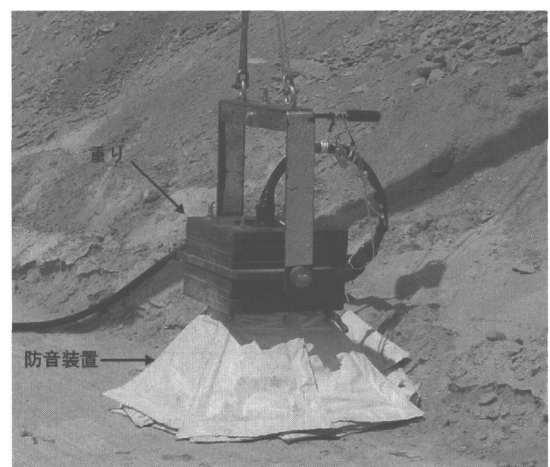


Photo. 3 防音装置

防音装置をプローブに装着した。通常はクレーンでこの装置ごとプローブを吊り上げ施工している。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。通常発生する騒音は、 $250\text{kJ}$  で放電した場合、放電位置から  $30\text{m}$  の地点で  $80\text{dBA}$  程度である。放電エネルギーが小さくすれば騒音レベルも低下する。

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。

## 4. 検証実験

### 4.1 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 150~240MPa の流紋岩で、大きさは約 0.2m<sup>3</sup>~4.0m<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 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。

Fig. 6 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、1m<sup>3</sup> 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。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。

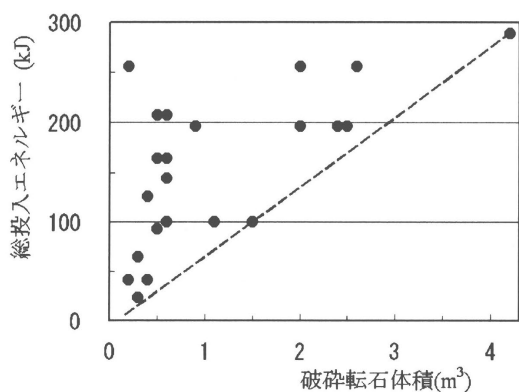


Fig. 6 転石破碎結果

### 4.2 自由面と投入エネルギー

自由面と投入エネルギーの関係を求めるために同一地山（砂岩で一軸圧縮強度 60Mpa）で転石、溝間の破碎、ベンチカットの 3 ケースについて試験を実施した。

実施にあたっては、解り難い『破碎の定義』を、「バケットの爪で容易に解体出来る程度までクラックを入れる。」こととし、Fig. 7 には、転石（6 自由面）、溝切削（3 自由面）、ベンチ（2 自由面）のそれぞれ単位

m<sup>3</sup>あたりの投入エネルギーをまとめてみた。

その結果、自由面の数によって投入エネルギーは大きく異なり、盤打ち施工（1 自由面）では周辺拘束力が大きく、3,000kJ/m<sup>3</sup> オーダの非常に大きなエネルギーが必要と推測される。

盤打ちの施工性を考えると、補助工法として連続孔などのスリット等で縁を切り、自由面を形成し、プラズマ破碎の方が効率的な方法と考える。

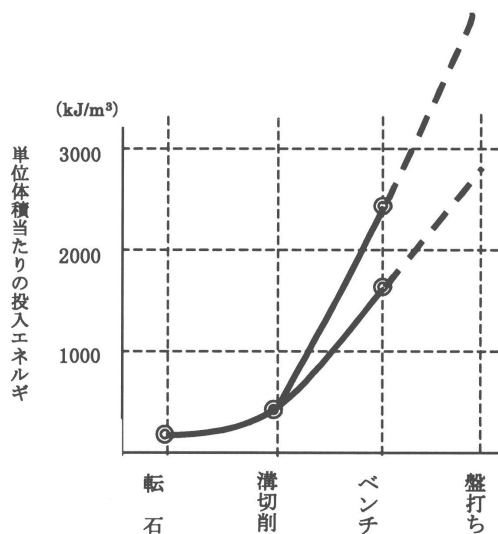


Fig. 7 破碎のための投入エネルギー

## 5. 施工実績

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。

### 5.1 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約 80 基を PAB 工法にて破碎した。

当該地域は周辺民家から 20 m と近接しており、騒音の問題でブレーカは使用できず、静的破碎剤の予定であったが、鉄筋等の拘束により穿孔ピッチを小さくしても破碎が難しく、効率が悪い等の問題があった。当工事では、1.5m×1.5m の基礎に 1 孔~3 孔削孔し、地表から深さ 50cm までの鉄筋コンクリートを 100~150kJ/回の放電破碎により、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。



Photo. 4 施工状況



Photo. 7 市街地における作業状況



Photo. 5 破碎状況

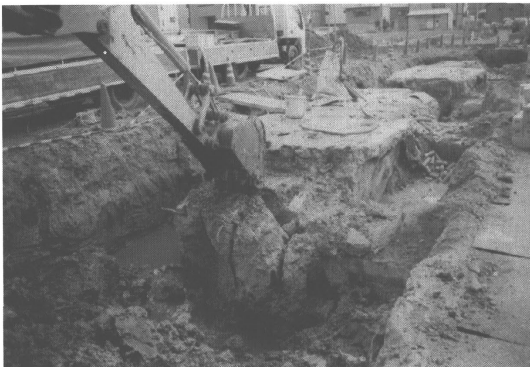


Photo. 6 放電後の解体状況

## 5. 2 市街地での解体工事例

騒音振動規制の厳しい市街地での事例をPhoto. 6に示す。コンクリート基礎約60m<sup>3</sup>を解体し、二次破碎はバックホウのバケットのみで行った。

また、Photo. 7は、鉄道駅部の営業線直近での杭頭処理工事であるが、放電破碎の影響が鉄道の信号ケーブルに支障無く、無事施工できた事例である。

## 5. 3 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。

Photo. 8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”（粘っこく）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。



(転石 6m×3m×1.5m)

Photo. 8 花崗岩破碎状況

## 5. 4 橋脚解体工事例

本工事は、立体交差下部工の新設工事において、既存の橋脚を撤去するため、本工法を用いて、橋脚の一次破碎を行った事例である。当初、解体はワイヤーソーや油圧破碎機を利用して施工する予定であった。

Fig. 8 P 8橋脚の全体図に示すように斜線部を破碎した。削孔パターンはほぼ50cmピッチで、全体に配置している。穿孔鉛直方向にφ75の孔をコアドリルで施工した。また鉄筋の拘束をはずすために、カッターで表面から切断した。事前に配筋図が入手できなかったため、完全に鉄筋を切断するまでには至らなかったが、効果的であった。

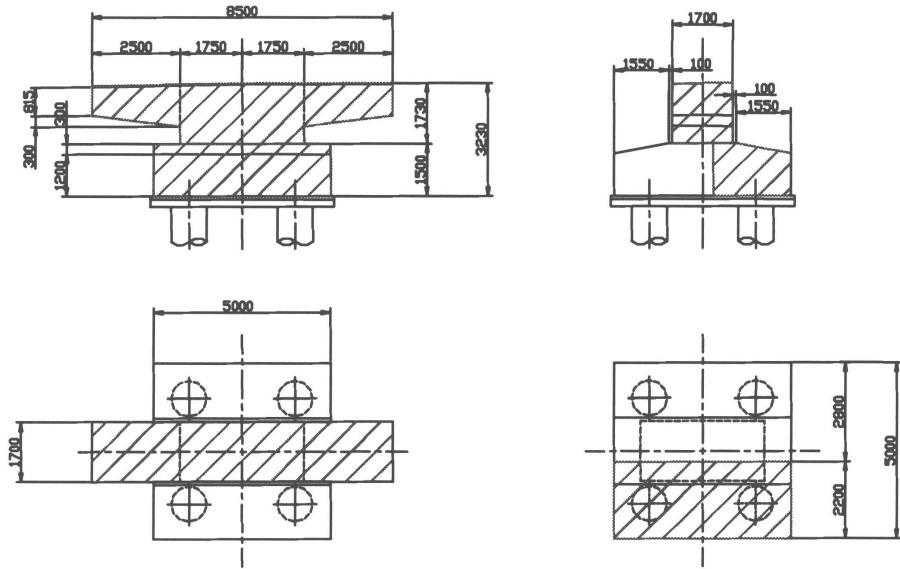


Fig. 8 P8橋脚の全体図

施工箇所を Fig. 9 に示すブロックで分け説明する。

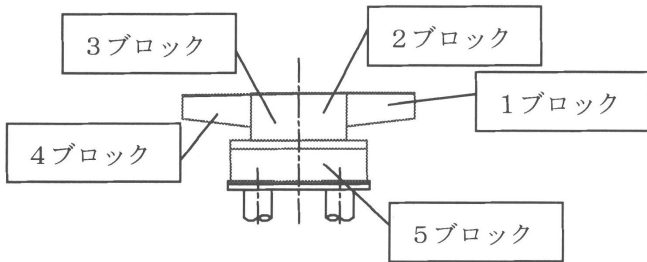


Fig. 9 ブロック割

ホウにて解体，除去した。

② 2次放電

1～3ブロックでは鉄筋の拘束を破砕するまでの投入エネルギーではなかったため，クラックが十分発達していなかった。すでに一部の孔は孔周辺が粉砕されていたため，追加の削孔をおこない，2次放電を行った。2次放電は上部の1～3ブロックに対して実施し，橋脚上部をバックホウにて破砕，撤去した。

これにより，橋梁下部の5ブロックで橋脚上部に隠れていた残りの部分と破砕が十分ではなかった基礎杭周囲の削孔を実施した。



Photo. 9 施工前状況



Photo. 10 施工状況

5. 4. 1 破砕手順

放電は，1次から4次までの4回に分けて行った。

① 1次放電

1次放電は，1～4ブロックと5ブロックの一部の放電可能個所で，橋脚の破砕個所の全体に対して実施した。これにより4ブロック全体と5ブロックの一部をバック

③ 3次放電

3次放電は5ブロックの追加した孔へ実施し，バックホウにて破砕，撤去した。その結果，5ブロックの杭頭周囲が残ったため，追加で削孔した。

④ 4次放電

追加した孔に4次放電を行い，バックホウにより残りの部分を解体し破砕を完了した。

破碎に要したエネルギーをブロック別に Table 2 ブロック別容積と放電結果に表す。

Table 2 ブロック別容積と放電結果

	ブロック 番号	容積 ( $m^3$ )	投入エネルギー (kJ)	放電 回数	$m^3$ 当り 投入エネルギー (kJ/ $m^3$ )	$m^3$ 当り 放電数 (回/ $m^3$ )
橋脚上部	1	4.1	21,045	64	5,133	15.6
	2	4.8	22,963	77	4,784	16.0
	3	4.8	19,349	67	4,031	14.0
	4	4.1	20,313	60	4,954	14.6
橋脚下部	5	15.4	68,392	273	4,441	17.7
全体		33.2	152,062	541	4,580	16.3



Photo. 12 上部解体状況

全体では、投入エネルギーは平均で  $4,580\text{kJ}/m^3$  となった。これは鉄筋の影響により破碎が困難であったことを示している。無筋コンクリートは数  $100\text{kJ}/m^3$  で破碎できる実績からすると予想を越えるエネルギーで、 $m^3$ 当りの放電数は 16.3 回となっている。

ブロック別に見ると 1・4 ブロックの投入エネルギーが他より大きい傾向が見られる。これは、その他のブロックより鉄筋量が多いこと、また削孔長が短いために、エネルギーが上部へ逃げていたものと考えられる。



Photo. 11 解体状況

#### 5. 4. 2 投入エネルギーについて

今回の全橋脚  $33.2m^3$  のプラズマ放電による総投入エネルギーは、 $152,062\text{KJ}$  で、 $m^3$ あたりの投入エネルギーは  $4,580\text{kJ}/m^3$  となり、従来の投入エネルギー（無筋コンクリート  $200\text{kJ}/m^3$ 、転石  $180\text{kJ}/m^3$ 、岩盤のベンチ掘削  $1,500\sim 2,500\text{kJ}/m^3$ ）に比して破格的な投入エネルギーである。

Photo. 11 は、解体状況を示すが、コンクリートの内部は細かく粉砕されていることがわかる。これは周囲の鉄筋の拘束の中で投入されたエネルギーが孔の周囲のコンクリートを必要以上に細かく破碎していったためである。

また今回は、ブロック全体を放電完了後、バックホウで解体する方法をとった。PAB工法はエネルギーを効

率的に利用するために自由面が必要となるが、前列破碎部分を残したままの後列破碎作業が放電回数（投入エネルギー）を増大させた要因と考えられる。

#### 5. 4. 3 鉄筋量の大きな構造物の解体

今回の P8 橋脚の解体工事では、事前に配筋図が入手できなかったが、鉄筋の位置を予測し、表面にある上筋の鉄筋の拘束を断つためにウォールソーにてスリットを入れた。予想以上に鉄筋量が多く、またスリットでは切断していない主筋も多くあった。そのため、当初の計画の孔数では、鉄筋がうまく切断できた 4 ブロックのウ



Photo. 13 表面破碎全体状況

ィングを除いて内部のコンクリートは破碎できても、表面の鉄筋の拘束によりクラックが大きく発達せず、そのためバケットの爪が立てられずに解体量が抑えられる原因となった。

その対策として上部、下部ともに自由面に近い位置に再度孔数を追加して、クラックが表面に十分に見えるように破碎し鉄筋が露出するまで放電を行った。これにより D16 の帯筋が放電の衝撃波の膨張圧で破断するなど、その後の解体自体は杭部を除いてスムーズであった。



Photo. 14 解体終了

## 6. まとめ

PAB工法を実用化して2年となった。その中で当初想定していた岩盤破砕に対して、コンクリート構造物の1次破砕に利用するニーズが増加し問い合わせも多い。新しい破砕技術の基礎となる本工法については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に開発普及

を図っていききたい。

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。

## 謝辞

本技術の開発では、共同開発者である奥村組土木興業、住友電工、およびご指導頂いた関係者の方々に多くのご協力、ご支援を頂きました。この場をお借りして感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 垣内・北原他：プラズマによる岩盤破砕技術（PAB），土木学会西部支部技術発表会 2002年2月，pp. 23-28
- 2) 垣内・北原：プラズマによる岩盤破砕技術の開発，北陸の建設技術，Vol. 113号 2002年7月，pp. 20-23
- 3) 北原・垣内：プラズマによる破砕技術の開発，建設の機械化，No. 629，2002年7月，pp. 39-44
- 4) 北原・垣内：プラズマによる破砕技術の開発について，平成14年度近畿地方整備局管内技術発表会，2002年7月，施・安22-pp. 1-4
- 5) 吉井，北原他：高電圧放電破砕技術（破砕能力の研究について）資源素材学会年次講演会，2002年9月，pp. 121-124

---

## Research and development of plasma-based fragmentation technology

Yukio KAKIUCHI, and Shigeo KITAHARA

### Abstract

With the growing urbanization of recent years, a strong need has arisen for measures to deal with the effects on houses and other structures of noise and vibration produced by civil engineering work. Despite a ban on blasting, and limitations on the use of large excavation (cutting) machinery in medium to hard rocks, and the like, noise and vibration levels have not fallen. In response, a project to develop means to fragment rock using only water and electricity has now produced the environmentally friendly technology referred to as “plasma acoustic blasting” (PAB). This report presents an outline of the technology, the results of testing, and an example of its use in the demolition of a reinforced concrete building.

Keywords: Plasma, discharge, rock fragmentation technology, shock wave

---