放電によるプラズマ破砕技術の開発

垣内　幸雄[1]・北原　成郎[2]

[1]法人会員　㈱熊谷組　土木本部トンネル技術部　副部長（〒162-8557 東京都新宿区津久戸町２番１号）
[2]法人会員　㈱熊谷組　土木本部機材部　課長（〒162-8557 東京都新宿区津久戸町２番１号）

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．こうした背景より，火薬類を使用しないで『純粋に電気だけで岩を割る』事に注目し，プラズマによる破砕技術（ＰＡＢ：Plasma　Acoustic　Blasting）を開発した．周辺環境や安全上から火薬の使えない場所での岩盤やコンクリート構造物の破砕・解体作業の効率を向上することを目的とし，ブレーカや静的破砕剤にかわる新工法として，衝撃波を自由に発生する放電破砕技術を確立することを狙いとし開発を進めている．

本論文では，システムの概要および施工事例を解説する．

キーワード：放電，破砕，環境，プラズマ，解体

１．はじめに

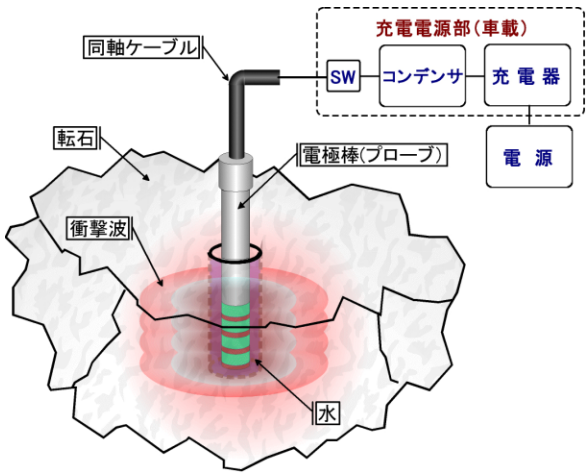
近年，土木工事も都市化に伴い，住宅や近接構造物等の周辺環境に与える騒音・振動が，大きな問題となってきた．そのため，発破工法は使用できず，大型掘削（切削）機械を採用しても中硬岩地山では掘削能力に限界が有り，難渋する事が多い．
今回，こうした背景より『水と電気だけで岩を割る』ことに注目し，環境に優しいプラズマによる岩盤破砕技術（ＰＡＢ：Plasma　Acoustic　Blasting）を開発した．
以下本報では，本システムの概要と試験結果及び鉄筋コンクリート構造物の解体事例について報告する．

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砕するものである（**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砕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．

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－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．



図－１　技術概要図

(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－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0.5μH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．

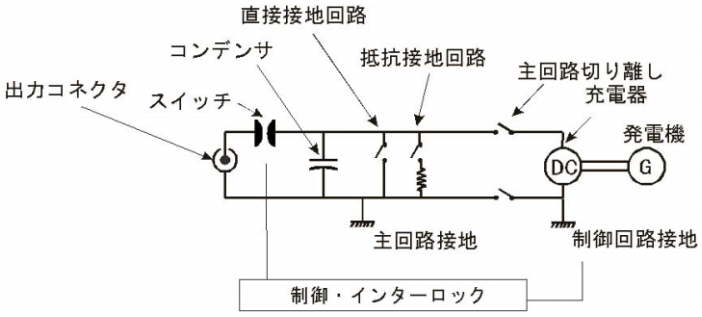
(2) 充電器

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．

図－２　プラズマ破砕システム概要

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－３　基本回路図

(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333μF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．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個積み重ねても1m×1m×0.7m程度にしかならない．

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こし，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るように鉄製パイプとした．

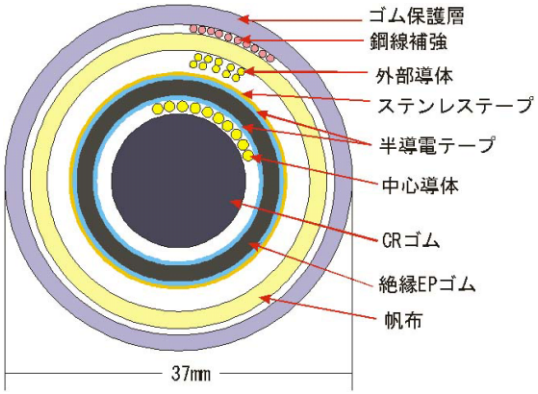
回路の特性として放電エネルギーが極大になる外部負荷抵抗値（放電抵抗値）が存在し，放電エネルギーの極大値は回路抵抗を小さくするほど大きくなる．そのため，充電電源部の抵抗値を小さくし，さらに**写真－１**に示すように，プローブ先端の放電部には複数のギャップを設けて放電抵抗が回路の最適値に近づくよう工夫している．各ギャップ間で放電が起こるため，複数個のアークが発生するようになったことと，エネルギー効率が向上したことの相乗効果で破砕力が飛躍的に増大した．プローブの長さ

写真－１　　放電後のアーク痕跡
（４連直列キヤップ）

は1.0 m～3.0m，外径は50mmと25mmの２種類がある．

(6) ケーブル

ケーブルの断面図を**図－４**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．



図－４　耐圧ケーブル断面図

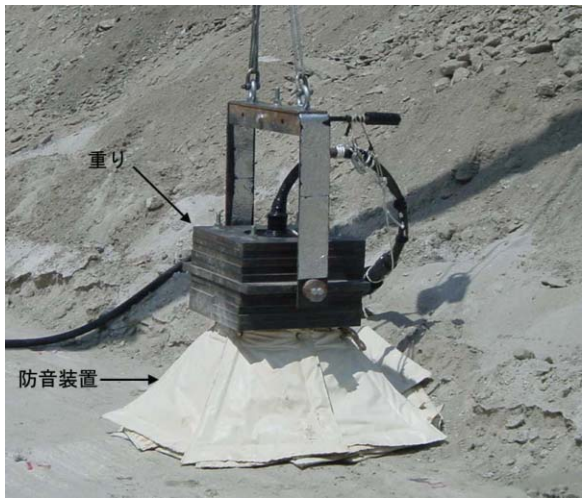
また，電流が導体の表面にしか流れない特性を利用して，中心導体の中央部を中空にし，ゴムで置き換えている．このことでエネルギーロスの低減とケーブルの柔軟性を同時に達成することができた．全長は標準では約30mで，同軸コネクタにより延長が可能である．

(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，250kJで放電した場合，放電位置から30ｍの地点で80dB(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．

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．

発電機と電源をユニック車に積載し，プローブは



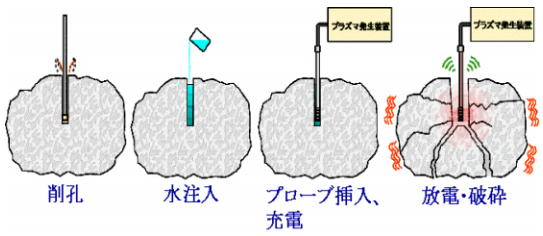
写真－２　防音装置

写真－３　現場作業状況

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．

４．岩破砕試験

岩破砕手順を**図－５**に示す．破砕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．所定のエネルギーを蓄積した後放電し，岩を破砕する．



図－５　岩破砕手順

(1)転石破砕試験

破砕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75㎜の孔を削孔面のほぼ中央に設けた．

破砕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

写真－４　破砕後の転石

された破片に分かれることが多い．破砕後の状況を**写真－４**に示す．

図－６に転石破砕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

写真－５　岩盤破砕状況

を破砕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，破砕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砕効果は水とほとんど変わらない．

(2)ベンチカット破砕試験

試験場にてベンチカット破砕を行ったが，この場合の削孔ピッチは700㎜で，プローブの挿入深さは500㎜である．破砕するには，1回当たりの放電エネルギーが256kJで1孔あたり3回の放電が必要であった．

(3)岩盤破砕試験

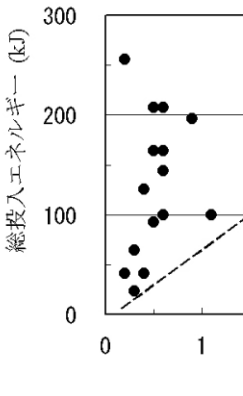
平面的な広がりを持つ岩盤上で破砕実験を行った時の破砕状況を**写真－５**に示す．この場合の削孔ピッチは500㎜で，プローブの挿入深さは500㎜である．

1回当たりの放電エネルギーが400kJで1孔あたり3回放電した結果である．

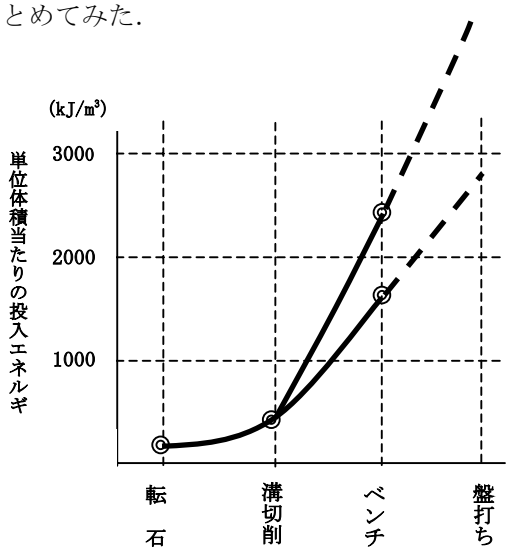
(4)自由面と投入エネルギー

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，溝間の破砕，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，明確な『破砕の定義』は無いが，《バケツ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，**図－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m³あたりの投入エネルギーをまとめてみた．



図－６　転石破砕結果



図－７　破砕のための投入エネルギー

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，3000kJ/m^{3}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，プラズマ破砕する方が効率的な方法と考える．

５．電磁誘導・漏洩電流及び振動・騒音測定

プラズマ破砕は，穿孔した孔に水を注入した後，電極棒を挿入し，電極から高出力放電を行う．この時に生じたプラズマが急激に膨張することにより衝撃波を生ずる．

高電圧放電によって発生するプラズマによる周辺電気機器への影響を調査するため，「漏洩電流測定」，「電磁測定誘導」とプラズマ破砕による振動・騒音の測定を実施した．

表―２　測定器一覧

機 器 名	形　式	メーカー	使用台数	特　　性
漏洩電流検知器	S．C．D	日本化薬(株)	1	内 部 抵 抗 ：０．９～１．１Ω 測 定 範 囲 ：０～３００mA
漏洩電流測定器	ニッサン	日本油脂(株)	1	測 定 範 囲 ：AC、DC ０～３００mA ：AC、DC ０～３００V
振動レベル計	VM-５２	リオン(株)	1	ピックアップ：PV-８３B 測 定 範 囲 ：３０～１２０dB 周波数範囲 ：１～９０Hz
騒音レベル計	NA-２０	リオン(株)	1	測 定 範 囲 ：A、C特性３５～１３０dB 周波数範囲 ：A、C特性２０～８，０００Hz
レベルレコーダ	LR-０４	リオン(株)	2	周波数範囲 ：１．６～２０，０００Hz 記録ﾚﾍﾞﾙ範囲：５０dB 紙送り速度 ：０．０１～３０mm／sec チャンネル数：１ch

※今回の電磁誘導測定には，漏洩電流検知器（S．C．D）を使用した．

表―２には測定に使用した機器一覧を示す．

（１）電磁誘導および漏洩電流測定結果

測定結果を**表－３**，**表－４**に示す．電磁誘導，漏洩電流ともに検知されなかった．

表－３　電磁誘導測定結果

測定回数	6月13日 距離：34m		6月13日 距離：10m		6月14日 距離：10m	
	測定時間	測定結果	測定時間	測定結果	測定時間	測定結果
①	11:15	検知されず	14:32	検知されず	9:55	検知されず
②	11:19	検知されず	14:38	検知されず	10:00	検知されず
③	11:23	検知されず	14:44	検知されず	10:04	検知されず
④	11:27	検知されず	—	—	10:10	検知されず
⑤	11:32	検知されず	—	—	10:14	検知されず
⑥	11:36	検知されず	—	—	10:20	検知されず
⑦	11:40	検知されず	—	—	10:24	検知されず
⑧	11:43	検知されず	—	—	10:29	検知されず
⑨	11:46	検知されず	—	—	10:35	検知されず
⑩	11:50	検知されず	—	—	10:40	検知されず
⑪	11:53	検知されず	—	—	—	—
⑫	11:56	検知されず	—	—	—	—
⑬	11:59	検知されず	—	—	—	—
⑭	12:02	検知されず	—	—	—	—

表－４　漏洩電流の測定結果

測定回数	6月13日 距離：34m		6月13日 距離：10m		6月14日 距離：10m	
	測定時間	測定結果	測定時間	測定結果	測定時間	測定結果
①	11:15	検知されず	14:32	検知されず	9:55	検知されず
②	11:19	検知されず	14:38	検知されず	10:00	検知されず
③	11:23	検知されず	14:44	検知されず	10:04	検知されず
④	11:27	検知されず	—	—	10:10	検知されず
⑤	11:32	検知されず	—	—	10:14	検知されず
⑥	11:36	検知されず	—	—	10:20	検知されず
⑦	11:40	検知されず	—	—	10:24	検知されず
⑧	11:43	検知されず	—	—	10:29	検知されず
⑨	11:46	検知されず	—	—	10:35	検知されず
⑩	11:50	検知されず	—	—	10:40	検知されず
⑪	11:53	検知されず	—	—	—	—
⑫	11:56	検知されず	—	—	—	—
⑬	11:59	検知されず	—	—	—	—
⑭	12:02	検知されず	—	—	—	—

（２）騒音・振動測定結果

プラズマ破砕による振動・騒音の測定を16m～49mの距離で行った．**表－５**の測定結果から最大値は振動レベルで54dB(6/14　10:14)，騒音レベルでは87dB(6/13　11:23，6/14　10:24)が計測された．

表-５　振動・騒音測定結果

測定回数	ベンチカット 6月13日 距離：40～49m			ベンチカット 6月13日 距離：16～22m			転　石 6月13日 距離：30m			ベンチカット 6月14日 距離：18～24m		
	測定時間	振動 (dB)	騒音 (dB)	測定時間	振動 (dB)	騒音 (dB)	測定時間	振動 (dB)	騒音 (dB)	測定時間	振動 (dB)	騒音 (dB)
①	11:15	52	86	14:32	53	×	15:16	(37)	(79)	9:55	×	84
②	11:19	51	85	14:38	53	×	15:23	(40)	(79)	10:00	52	84
③	11:23	53	87	14:44	53	85	15:30	(45)	(76)	10:04	51	86
④	11:27	51	85	—	—	—	15:39	(37)	(79)	10:10	51	85
⑤	11:32	45	86	—	—	—	15:46	(36)	(79)	10:14	54	86
⑥	11:36	46	85	—	—	—	—	—	—	10:20	52	86
⑦	11:40	46	84	—	—	—	—	—	—	10:24	53	87
⑧	11:43	50	83	—	—	—	—	—	—	10:29	50	86
⑨	11:46	44	86	—	—	—	—	—	—	10:35	45	86
⑩	11:50	49	85	—	—	—	—	—	—	10:40	50	85
⑪	11:53	46	84	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⑫	11:56	41	85	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⑬	11:59	47	86	—	—	—	—	—	—	—	—	—
⑭	12:02	48	85	—	—	—	—	—	—	—	—	—

この振動・騒音レベルの最大値を，「気象庁震度階級別振動レベル換算表」「騒音の例（公害防止の技術と法規　騒音編）」に当てはめると次の範囲に該当する．

☆振動レベル：54dB →「震度０，無感」，「人は揺れを感じない」

☆騒音レベル：87dB →「地下鉄電車内，バス車内」

であるが，これら測定値は，常時発生している振動・騒音と異なり，2/10000秒の放電に伴う瞬時に発生するもので，実際には周辺環境に及ぼす影響は小さいと思われる．

６．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，その基礎部コンクリートを60基PAB工法にて，破砕した．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．当初静的破砕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砕が困難であり，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，放電破砕した．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砕機でつかめる程度にクラックを入れ，支障なく破砕した．

写真－６　施工状況

写真－７　破砕状況

(2)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，騒音低減する目的でＰＡＢを導入した．約60cm間隔で約2m程度穿孔し，放電破砕した．

写真－８　ケーブルクレーン基礎解体工事

(3)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．二次破砕はバックホウのバケットのみで行った．

写真－９　都市域における穿孔状況

写真－１０　放電後の解体状況

７．まとめ

ＰＡＢ工法を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．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．

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,P23-P28

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,P20-P23

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,P39-P44

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-P1-P4

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,P121-P124