

16. 放電衝撃破碎装置および工法の開発

(株)大林組： 風間 慶三
日立造船(株)：*前畑 英彦, 荒井 造成,
西田 昭二

1. はじめに

岩石・岩盤の破碎工法として、発破は最も効率的で低コストであり、工法の性能や特質も高度化され、土木・建築工事分野で広く採用されている。しかしながら一方では、大きな低周波振動や騒音および飛石など周辺環境への影響は避けられず、都市部や一般住宅近傍での岩石破碎・岩盤掘削工事への適用は困難な状況にあり、発破を使わない工法あるいは静的破碎工法の開発要請が高まってきている。¹⁾

放電衝撃破碎工法は、これに呼応して開発されたもので、破碎効率を確保するとともに周辺環境への影響が小さい非発破工法として期待できる。²⁾ ここでは、まず放電衝撃力発生技術と破碎装置について基本的な特質・性能を述べ、次に割岩および岩盤破碎への適用性を評価するために行った現地実証試験結果および放電衝撃破碎工法の基本技術としてまとめた開発成果を報告する。

2. 放電衝撃力発生技術³⁾

2.1 基本原理および基本回路

コンデンサなどに蓄積した電気エネルギーを短時間で放出、すなわち放電パルス化すると、大電力を局部に集中することができる。この大電力パルスエネルギーを金属細線に供給すると、細線は熔融・酸化現象により瞬時に数万倍の金属蒸気体積に膨張し、その際に衝撃波(正圧空洞)が発生する。この現象が液中の場合、金属細線をとりにく液の蒸気化爆発力も加わり、衝撃力として液中を高速伝播する。この衝撃力は、細線近傍約1cmの位置で数10tonf/cm²、発生期間数10 μ sのショックエネルギーとなる。

図1は放電パルス発生の基本回路と岩石などの脆性材を放電衝撃で破碎する原理を説明するものである。コンデンサへの電荷蓄積は、直流高圧電源から充電制御回路により急速充電され、電子スイッチはこの蓄積エネルギーを急峻な大電力パルスとして金属細線に供給し、衝撃力を発生する。金属細線は、水を充填した放電カートリッジの中にあり、この放電カートリッジは被破碎物に穿孔・装填される。なお、破碎の規模に応じて複数個のカートリッジと放電回路による斉発が用いられる。

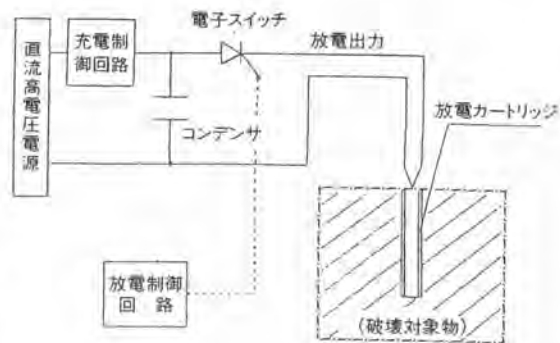


図1 放電衝撃力発生と破碎原理

2.2 発生衝撃力の基本特性

(I) 放電および衝撃力波形 図2は $V_c=6,300V$ 、 $C=500\mu F$ で細線($\phi 0.8mm$ 、長さ4mm)に放電した際の放電波形および衝撃力波形の一例を示したものである。細線両端電圧は、放電電流のピーク値付近

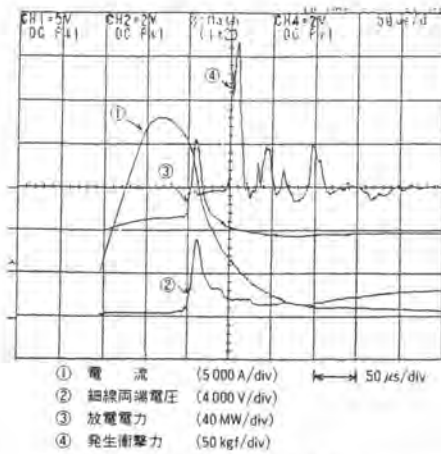


図2 放電および衝撃力波形

から急激な増加が見られるが、これは細線が溶断・気化を示しており、放電電力のピーク値とも一致している。また、衝撃力はこの時点で20 μsの急峻パルスとして発生しており、図中の50 μsのズレはちょうど圧力センサまでの距離8cmの伝播時間に一致する。なお、実験は大型コンクリート水槽内で行い、圧力はキスラー製水晶圧電式力センサ9213A 1型（固有振動数:200kHz）、電圧はパルス電子製高電圧プローブEP-50K（~50MHz）、放電電流はピアソン製CTカレントモニタ101型（~4MHz）を用い測定した。

(2) 金属細線条件 細線条件は供給エネルギーと発生衝撃力の関係に大きく影響する。図3は、細線径(断面積 S_w)と発生衝撃力 F (細線から1cmの位置)の関係について、ある充電電圧 V_c 調べた一例である。この関係は細線長についても同様の傾向を示し、各電圧に対応した最適線径および線長を選択する必要がある。

(3) 充電電圧 V_c との関係 図4は、コンデンサの静電容量 C を500 μFとした場合の充電電圧 V_c と衝撃力 F の関係を調べたものである。両者には、

$$F \propto V_c^n \quad (1)$$

の関係(同図では $n=1.5\sim 2$)の関係が見られ、1,000~2,000Vで数tonf/cm²であり、5,000~10,000Vで数10tonf/cm²の衝撃力と推定される。(1)式の関係は、コンデンサの蓄積エネルギー W が

$$W = 1/2 C V_c^2 \quad [J] \quad (2)$$

の関係式で表されることから説明できる。なお図4を F と W の関係で整理すると、 $F \propto W$ の関係になる。一方、 F は放電電力 P (放電電圧×放電電流)とも比例関係にあることを確認している。

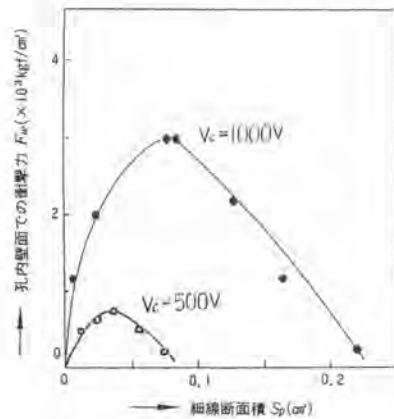


図3 金属細線断面積と衝撃力の関係

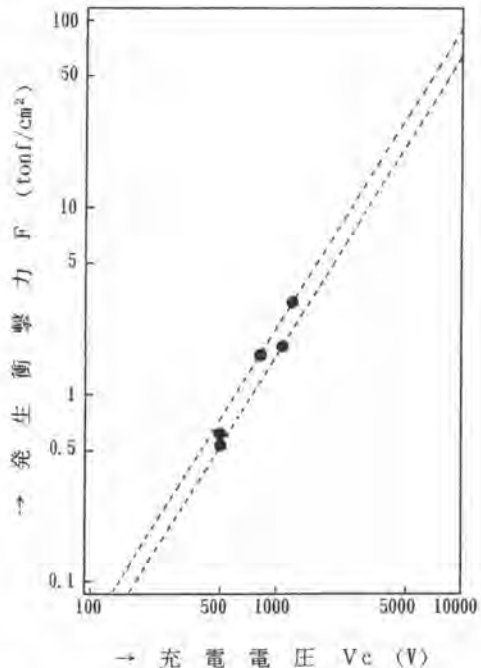


図4 充電電圧と発生衝撃力の関係

3. 放電衝撃破砕システム

図5にシステム構成を示し、各部について以下に説明する。

3.1 放電衝撃力発生装置

この装置のKey技術である高電圧大電流パルスの発生は、近年注目されつつあるパワーエレクトロニクス時代の到来に先駆けて開発したものである。すなわち、高速大電力電子スイッチング技術と自己修復型高密度エネルギー蓄積コンデンサの採用である。図6は、10,000V-60,000Aの放電パルスを4出力装備した開発装置の外観写真を示す。装置仕様は以下の通り。

- ・入力：1φ200V or 100V-2kVA
- ・蓄積エネルギー：
[$V_c=10000V, W=25000J$] $\times 4$
- ・充電時間：90sec以下
- ・4種類の安全機能回路装備
- ・W1950×D840×H1500mm, 1300kg

写真の左端Boxは電源制御盤、右2つはそれぞれ2出力装備のパワーユニット盤である。この装置は、2kWの発電機と共に車輻(2~3ton)

に搭載した状態で現場に入り、そのまま作業できる仕様にしている。

3.2 放電カートリッジおよび放電供給ケーブル

放電カートリッジは、高圧ケーブルにより供給される放電エネルギーを衝撃力に変換する重要な構成要素である。基本構造を図7に示す。プラスチック容器に水などを充填し、この中に2本の導線に接続された金属細線を挿入したものである。どの穿孔方向にも対処できるゼラチンタイプも開発しており、サイズはφ12×100mm、φ18×100mm、φ38×120mmで $V_c=6,000V$ 、 $8,000V$ および $9,000V$ 用が基本タイプである。

放電供給ケーブルは、各出力の独立性と地絡電流防止から1出力に2本を用いる。また、ケーブルの分布定数は放電エネルギーの損失を決定する要因となり、ケーブル長と敷設方法に配慮する必要がある。この破砕システムでは、衝撃力発生装置から60mまでは発生衝撃力に低下はない。

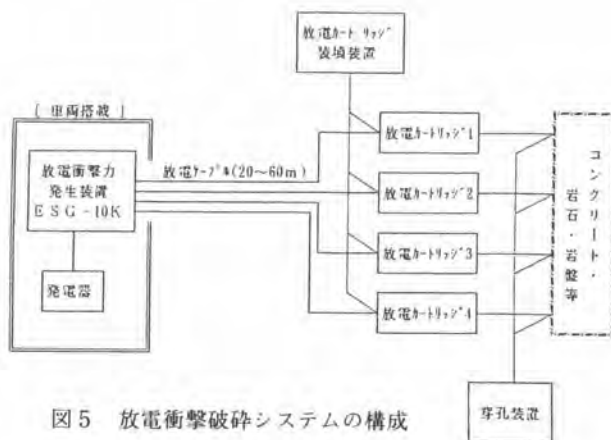


図5 放電衝撃破砕システムの構成



図6 放電衝撃力発生装置（4出力型）

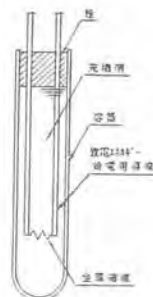


図7 放電カートリッジ

3.3 破碎作業フローと周辺支援機器

図8に破碎作業の工程フローを示す。まず、放電カートリッジの径よりやや大きい($\phi 13\sim 20\text{mm}$)孔をカートリッジ長以上の深さ($150\sim 500\text{mm}$)に穿孔し、放電カートリッジを装填する。その後、砂などでタンピングし、放電ケーブルをば結線すれば準備は完了する。ここまでの作業時間は、4孔斉発破碎の場合、

2人作業で約8minを要し、作業フローの80%になる。穿孔装置やカートリッジ装填・押付装置などの支援機器により機械化すれば半減が期待できる。



図8 放電破碎作業フロー

図9 現地破碎テストの状況

次に、放電衝撃力発生装置を充電した後、放電・残電荷消去で破碎作業は終了する。図9は、車輛に搭載した放電衝撃力発生装置による現地破碎テストの様子を示す写真である。

4. 岩石・岩盤の破碎性

4.1 現地破碎例

(1) 岩石破碎 放電衝撃法による岩石の破碎例を図10に示す。同図(a)は、 $W50\times D70\times H50\text{cm}$ の石灰岩(一軸圧縮強度 $\sim 150\text{MPa}$)を放電 $9,000\text{V}$ -1出力で破碎したものである。また(b)は、 $W50\times D100\times H70\text{cm}$ の花崗岩($\sim 170\text{MPa}$)を放電 $5,000\text{V}$ -4出力で破碎した例を示す。放電衝撃法による岩石の破碎性能は、花崗岩の場合、 $10,000\text{V}$ -1出力で 0.2m^3 、 $10,000\text{V}$ -4出力で 0.8m^3 前後の岩塊破碎に適用できそうである。



(a) 石灰岩($W50\times D70\times H50\text{cm}$)



(b) 花崗岩($W50\times D100\times H70\text{cm}$)

図10 岩石の破碎例

(2) 岩盤破碎⁴⁾ ここでは、「心抜き」と「払い出し」破碎テスト結果を紹介する。

心抜き破碎テストは、ハンマー打撃により亀裂のない岩盤(花崗岩:100~170MPa)を選んで行った。図11は穿孔角45°、Vカット高さ30cm、抵抗線21cm、孔間隔45cmの心抜き穿孔条件で破碎した結果である。放電8,000V-4出力斉発により、W45×H30×D25cm(破碎体積0.02m³)のV溝破碎している。実用レベルには50cm(0.1m³)程度の心抜き深さが必要であり、放電衝撃法を適用する場合には、ボアホールなど用いる



図11 岩盤の心抜き破碎例



(a) 破碎前



(b) 破碎後

図12 岩盤の払い出し破碎例

必要があろう。

一方、払い出し破碎の結果を図12に示す。これは放電9,000V-3出力により砂岩の岩盤(100~120MPa)をを破碎したもので、穿孔(放電点)を結ぶように直線的に破碎しており、払い出しの体積は0.16m³であった。穿孔深さを30cm一定の条件で、放電8,000Vと9,000Vにより払い出し破碎できる抵抗線Wと孔間隔Dの最大値を調べた結果である。8,000V放電では、W_{max}とD_{max}いずれも30cm程度になり、9,000V放電ではW_{max}は30cmでD_{max}が40cmもしくは両者35cmであった。なお、両者にはテスト全体を通じ、W<Dの関係がみられた。破碎能力として、100MPa程度の岩盤なら、10,000V-4出力の斉発放電で0.2m³程度の

表1 放電電圧と抵抗線W、孔間隔Dの関係

[単位:cm]

D\W	5	10	15	20	25	30	35	40
5								
10								
15								
20								
25								
30			8,000V破碎範囲					
35								
40			9,000V破碎破碎					
45								(亀裂)

払い出し(ベンチカット)が見込める。また、破碎前後のシュミットハンマー値に差異がないことから、仕上げ用の制御破碎としての用途が考えられる。

(3) コンクリート破碎 無筋コンクリートに対しては、放電10,000V-1出力での破碎能力は約 0.3m^3 (70cm立方塊相当)あり、4出力では 1m^3 程度の破碎が見込める。しかし、鉄筋コンクリートについては鉄筋条件に大きく依存し、基本的には鉄筋露出破碎となる。図13、図14にそのサンプル破碎例(100cm角×20cm厚)を示し、 $\phi 13\text{mm}$ 鉄筋を $15\times 20\text{cm}$ メッシュ2段に配筋したものである。この場合、である。この場合、穿孔に配慮を要することから、穿孔しないで破碎する表面衝撃破碎が望まれる。



図13 鉄筋コンクリートの破碎例 I



図14 鉄筋コンクリートの破碎例 II

4.2 発生騒音・振動データ

本破碎法は、金属の細線爆発力によることから500~2,000Hzにピークを持つ瞬時(1sec以下)の高周波音を発する。現地坑内テストで、破碎位置から10m離れた位置での騒音レベルは90~120dBであった。岩盤を破碎した場合は小さく、孔の詰め栓が抜けて未破碎の時は、110dB以上を示した。一方、屋外破碎では90~94dBであった。

また、発生衝撃力が数 10tonf/cm^2 に達するもの数 $10\mu\text{sec}$ (高周波成分)の単一パルスのため、地盤振動の減衰は大きい。振動は、いずれもバックグラウンドレベルの範囲を出ていない。さらに、岩盤破碎後の有毒性ガスおよび粉塵の発生は見られなかった。

5. まとめ

以上に、放電衝撃破碎装置および工法の特質・性能の概略を紹介した。放電衝撃破碎法は、発破と類似した破碎形態および作業工程であるが、「非発破工法」として対環境性を考慮して開発されたものである。以上の紹介内容に補足して、本開発技術の特徴を以下に総括まとめておく。

- ① 非発破工法として安全性、作業性に優れ、車輻搭載型の破碎装置のため機動性を有する。
- ② 6~8minの破碎作業サイクルで、割岩で 0.8m^3 、ベンチカットで 0.2m^3 の破碎性が見込める。
- ③ 無振動、低発塵で、騒音も90dB程度の瞬時破碎音のため、都市部・住宅圏でも適用できる。

最後に、本開発の推進にあたり多大な貢献をされた(株)大林組 吉岡尚也氏、須山恭三氏および日立造船(株) 塚原正徳氏、井上鉄也氏、玉越大介氏ほか関係諸氏に謝意を表し、お礼申し上げる。

<参考文献>

- 1) 野間、村山他：液圧を用いた岩盤・コンクリートの静的破碎工法の開発、土木学会論文集、第427/W-14、1991年P203
- 2) 前畑、荒井他：放電衝撃破壊法の開発、平成7年電気学会産業応用部門全国大会論文集、1995年、P163
- 3) 前畑、荒井他：放電衝撃破壊技術の開発-放電衝撃力の基本特性と岩石破碎性-、日立造船技報、56-4、1996年P52
- 4) 井上、前畑、荒井、風間他：放電衝撃破碎技術の開発(3,4報)、土木学会平成9年度全国大会