

## (80) EDDを用いた心抜き発破実験に関する考察

西松建設(株)技術研究所 ○田中義晴, 平田篤夫  
西松建設(株)土木設計部 寺本勝三, 一條俊之, 佐藤喬一  
旭化成工業株式会社 山本雅昭, 愛甲研一

### Examination about experiment center cut blasting used EDD

Yoshiharu TANAKA, Atsuo HIRATA,

Nishimatu Construction Co.,Ltd

Katuzou TARAMOTO, Toshiyuki ITIJO, Kyouichi SATOU

Nishimatu Construction Co.,Ltd

Masaaki YAMAMOTO, Kenichi AIKO

Asahi Chemical Industry Co.,Ltd

### Abstract

EDD (Electronic Delay Detonator) is high accurate detonator which control delay time by electronic circuit. In recent years, we need to pay attention to environmental of houses and construction in blasting field.

We did filed experiment of center cut blasting used EDD for the purpose of reducing amplitude of vibration, because the triggering form used pyrotechnic detonator is difficult to control the reduction of vibration. In this paper, we compare center cut blasting used EDD with these that used pyrotechnic detonator

## 1. 緒言

近年、発破現場において、住宅・施設の進出にともない、環境・公害問題が注目されている。発破現場の近辺に民家や建物がある場合、発破における振動、騒音等が問題となるため、各段あたりの薬量を制限したり、発破方法の工夫がなされているが、従来の段発電気雷管を使用したものでは、その秒時精度を上げることに限界があった。このような状況の中で、遅延方式として電子回路により秒時を設定する新しい高精度雷管が考えられており、これがEDD (Electronic Delay Detonator) と呼ばれるものである<sup>1)</sup>。

EDDの基本構成は、Fig. 1に示すように電気エネルギー蓄積コンデンサーと同コンデンサーを電源とする電気遅延素子及び電気スイッチング素子からなる電子式遅延回路が雷管点火装置と結合された電気雷管である。作動原理は、EDD用の発破器から供給された電気エネルギーを、電気エネルギー蓄積コンデンサーに蓄え、電気遅延素子により予め設定された時間後に、電気スイッチング素子を通して点火装置に供給し点火装置の発火により雷管を起爆させるものである。このEDDの開発により従来の延時薬雷管では不可能であった振動、騒音波の正確な重ね合わせが可能となった。そこで、我々は、EDDの効果の一つである、振動低減を目的として、EDDを用いた心抜き発破実験・計測と同時に、比較のために、従来の瞬発雷管のみを使用したものを行った。本論文では、その現場実験の結果報告と、この二種類の雷管による心抜き発破の比較検討を行う。

## 2. 実験概要

実験内容は、Fig. 2に示すようなA坑道壁面の計12カ所で心抜き発破を行った。図中の記号でHcは、通常の瞬発を使用したもので、EDDを使用した発破実験との破碎状況および振動の測定値の比較をするための基準として行うものである。発破パターンはFig. 3 (a) に示すV

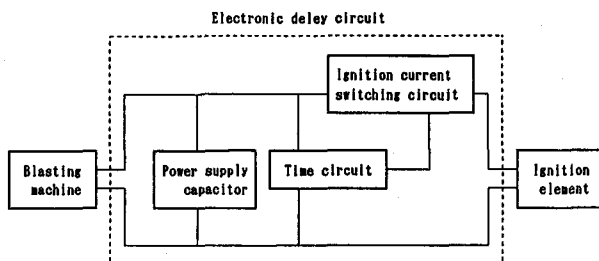


Fig. 1 EDDの基本構成

カットとし掘進長は1.0mとする。次に、 $V_A \sim V_D$ は基準発破と同様な発破パターン、 $B_B \sim B_E$ は、Fig. 3 (b)に示す発破パターンで、それぞれEDDを使用したVカットおよびバーンカット工法である。両工法ともTable 1 (a), (b)に示すように、秒時間隔と一孔当りの薬量を変えたパターンで行った。掘進長は、Vカットについては基準発破と同様1.0mとし、バーンカットでは、2.0mとした。

計測システムは、Fig. 2に示すように、速度計をB坑道壁面上のNo. 1～5の計5カ所に設置した。なお、各計測点には、B坑道軸方向をX方向、それと垂直な方向をYおよびZ方向として3成分の速度計を設置し、合計15個の速度計を設置した。

A坑道とB坑道の合流点より約20m坑口側に設置した計測室で、増幅器からの出力を10kHzのサンプリング周波数でA/D変換後、パーソナルコンピュータのハードディスクに記録した。B坑道壁面上の任意の速度計の出力をA/D変換後のトリガー信号として、遅延データ1kw (1024個)を含めて各チャンネル当り32kw (32,768個)のデータを発破毎に記録し、15チャンネル合計で、480kwのデータとする。計測結果は、A/D変換器内のメモリーに記録したのち、順次、パーソナルコンピュータに転送する。最後に、最大振幅値をプリンターに出力して、再度発破待機状態となる。なお、計測機器の総合周波数特性は100Hz～3kHzの範囲でほぼ平坦である。

### 3. 原位置状況

実験現場は、岩手県釜石鉱山の550m坑口より約1500mの蟹岳花崗閃緑岩帯にあり、土被りは約150mである。坑道はすばりの状態であり、細粒花崗岩の硬質岩盤からり、同一の岩盤から構成されていると考えることができる。発破点付近の坑道壁面上でコアボーリングを行い、一軸圧縮・圧裂引張試験と、超音波測定を行った結果は、Table. 2に示すようである。岩石試験の結果からわかるように、実験現場の岩質は非常に硬く、岩石供試体に亀裂はあるものの、破壊後の状態は、亀裂面で破壊せず、粉々に砕けていることから、非常に密で、損傷の少ないことがわかる。

また、実験現場における岩盤の異方性を調べるために、前述した発破振動の計測システムを使用してA坑道壁面上の発破点において、各点10回坑道壁面をハンマーで打撃し、B坑道壁面上の全速度計で受信した。受信

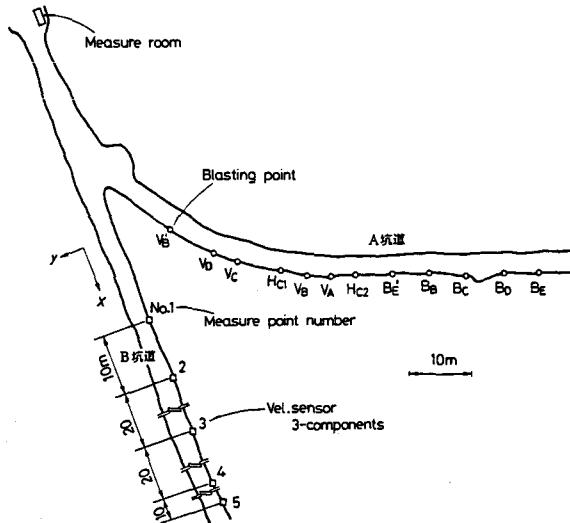


Fig. 2 発破点と計測点の平面位置関係

Table. 1 各心抜き孔の起爆秒時と薬量

(a) EDD (Vカット)

| 試験内容            |           | 段 数 |     |     |     |     |     |
|-----------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                 |           | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
| V <sub>A</sub>  | 起爆秒時(ms)  | 0   | 5   | 10  | 15  | 20  | 25  |
|                 | 薬量 (kg/段) | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| V <sub>B</sub>  | 起爆秒時(ms)  | 0   | 10  | 20  | 30  | 40  | 50  |
|                 | 薬量 (kg/段) | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| V <sub>C</sub>  | 起爆秒時(ms)  | 0   | 15  | 30  | 45  | 60  | 75  |
|                 | 薬量 (kg/段) | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| V <sub>D</sub>  | 起爆秒時(ms)  | 0   | 20  | 40  | 60  | 80  | 100 |
|                 | 薬量 (kg/段) | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |
| V <sub>B'</sub> | 起爆秒時(ms)  | 0   | 10  | 20  | 30  | 40  | 50  |
|                 | 薬量 (kg/段) | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 | 0.8 |

(b) EDD (バーンカット)

| 試験内容           |           | 段 数 |     |     |     |     |     |     |     |
|----------------|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                |           | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   |
| B <sub>E</sub> | 起爆秒時(ms)  | 0   | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 |
|                | 薬量 (kg/段) | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 2.8 | 2.8 | 2.8 | 2.8 |
| B <sub>B</sub> | 起爆秒時(ms)  | 0   | 25  | 50  | 75  | 100 | 125 | 150 | 175 |
|                | 薬量 (kg/段) | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 2.8 | 2.8 | 2.8 | 2.8 |
| B <sub>C</sub> | 起爆秒時(ms)  | 0   | 50  | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 |
|                | 薬量 (kg/段) | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 2.8 | 2.8 | 2.8 | 2.8 |
| B <sub>D</sub> | 起爆秒時(ms)  | 0   | 75  | 150 | 225 | 300 | 375 | 450 | 525 |
|                | 薬量 (kg/段) | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 2.8 | 2.8 | 2.8 | 2.8 |
| B <sub>F</sub> | 起爆秒時(ms)  | 0   | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 |
|                | 薬量 (kg/段) | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 2.4 | 2.4 | 2.4 | 2.4 |

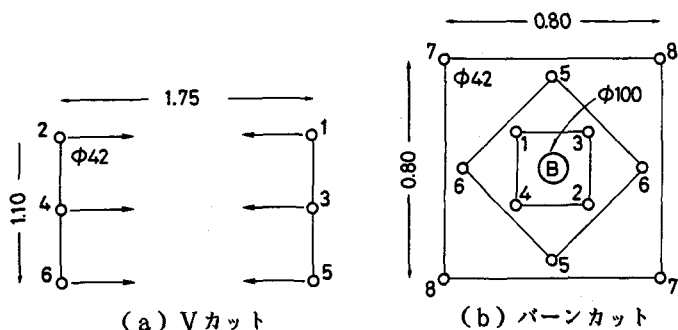


Fig. 3 発破パターン

Table. 2 岩石試験結果

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 単位体積重量 (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.66       |
| 一軸圧縮強度 (MPa)                | 300        |
| 圧裂引張強度 (MPa)                | 12         |
| 変形係数 (GPa)                  | 73         |
| ポアソン比                       | 0.24       |
| 超音波速度 $V_p$ (m/s)           | 5800 ± 100 |

した波形のうち、各計測点のY方向成分の波形をそれぞれ各打撃点と計測点間ごとにスタッキングし、初動を読み取り、打撃点と計測点間の弾性波速度を求めると、多少値はばらつくものの、 $V_p$ が6000 ± 100(m/s)となった。よって、実験現場における岩盤は亀裂が比較的発達しているにもかかわらず、 $V_p$ の値が大きいことから、大半の亀裂が閉合亀裂であり、非常に硬質な岩盤であることがわかる。また、実験現場を構成する岩盤は、 $V_p$ が6000m/s前後のほぼ均一な岩盤であると考えられる。

#### 4. 計測結果および考察

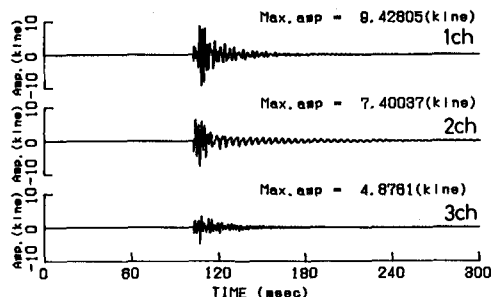
##### (1) Vカット

Fig. 4 (a) および (b) は、それぞれ瞬発雷管を使用した基準発破 $H_{c1}$ と、起爆秒時が10(ms)のEDDを使用した発破 $V_B'$ による発破振動波形例である。なお、両図とも、計測点No. 1で計測されたx, y, zの3成分波形であり、伝達距離は、 $H_{c1}$ と $V_B'$ ～計測点No. 1間がそれぞれ22.98mと15.88mである。両発破ともに、岩盤は起こせたわけだが、このFig. 4 (a)と(b)を比較すると、基準発破 $H_{c1}$ は、発破 $V_B'$ に比べて最大振幅値が伝達距離が長いにも関わらず大きく、また、減衰も大きい。EDDの発破振動波形は、Table. 1 (a)に示す全パターンにおいて、各段発の振幅の大きさが異なっており、これは、各段発の前段発で起こせたか否か、すなわち、前段発で完全に起きなかった場合、次の段発では、岩盤を破壊するのに大半のエネルギーが消費され振動エネルギーに変わるものが少ないのではないかと推測される。

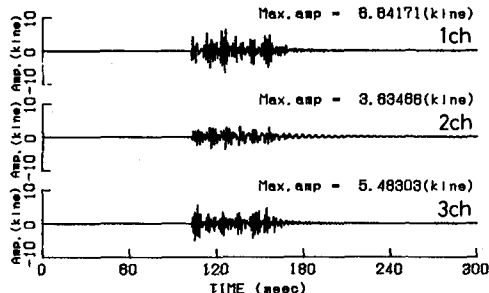
次に、Fig. 5は、基準発破(黒丸)とEDDを使用した発破(白丸)の全波形の最大振幅値と伝達距離との関係を示したものである。なお、図中の実線は基準発破、破線はEDDの発破の回帰直線である。両発破とも、伝達距離が長くなるにしたがって、最大振幅値は小さくなり、多少ばらつきはあるものの、EDDを使用した発破の方が、基準発破よりも最大振幅値に着目すると、約60%振動が低減されていることがわかる。

##### (2) パーンカット

Fig. 6 (a) および (b) は、それぞれ発破 $BE'$ 、 $BE$ において、ともに起爆秒時が100(ms)のEDDを使用し



(a) 基準発破( $H_{c1}$ )



(b) EDD発破( $V_B'$ )

Fig. 4 発破振動波形例

た発破振動波形例であり、発破 $B_E'$ は岩盤は起きたが、発破 $B_E$ は起きなかった。なお、両図とも計測点No. 1で計測された $x, y, z$ の3成分波形であり、伝達距離は、 $B_E'$ と $B_E$ ～計測点No. 1間がそれぞれ40.06mと63.85mで、一孔当りの薬量も、 $B_E'$ が1.4kg/孔、 $B_E$ が1.2kg/孔である。Fig. 6 (a)と(b)ともに、各段発の波形が明瞭に分離されており、伝達距離、薬量の違いを考慮すると最大振幅値に明瞭な差はないが、発破 $B_E'$ は、発破 $B_E$ と比べて各段の振幅の減衰が大きい。また、両発破ともに、初段から4段までの振幅を見ると、初段が大きく、2～4段は小さいことがわかる。バーンカットは、バーンホールを自由面とした装薬孔を順次起爆し、発破断面に垂直な自由面を次々と拡大していく発破であり、発破 $B_E$ は、各段発の前段発で満足に起こせなかったため、抵抗線が長くなり、爆薬のエネルギーが、岩盤を破壊することよりも、振動エネルギーへと変わる割合が大きくなったためではないかと推測される。

そこで、発破 $B_E'$  (実線)と発破 $B_E$  (破線)の各段発の波形に注目して、Fig. 6 (a), (b)のチャンネル2の波形をフーリエ変換するとFig. 7 (a)～(d)のようになり、それぞれ、初段から4段までのフーリエスペクトルである。また、Fig. 8は、計測点がNo. 2でチャンネル2の両発破による初段の振動波形をフーリエ変換したものである。Fig. 7より、各段発において発破 $B_E'$ と発破 $B_E$ のフーリエ振幅値に差はあるものの、卓越周波数は、異なる2つの発破にも関わらず、220Hzと500Hzに各段ともに一致し、スペクトル形状が似ていることがわかる。また、Fig. 8も同様に、卓越周波数が220Hzと500Hzであり、これは、計測点No. 1, 2の

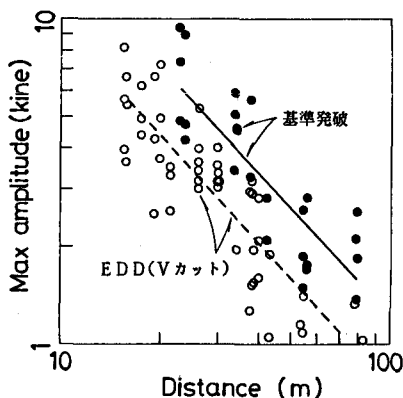
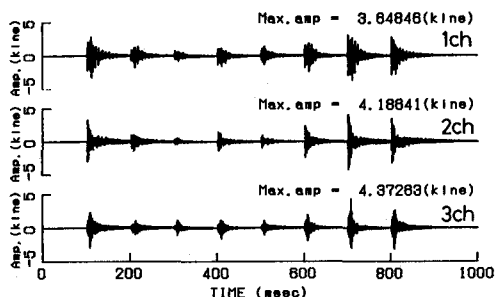
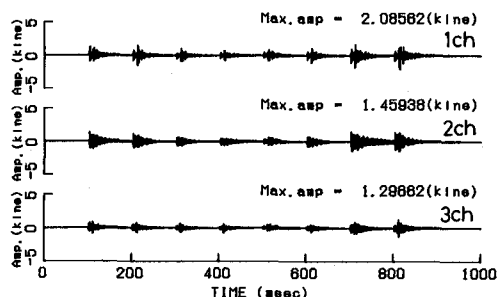


Fig. 5 基準発破とEDD発破の最大振幅値と距離の関係

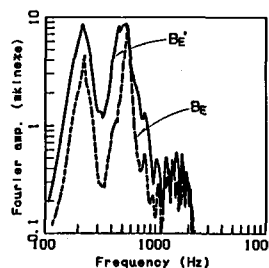


(a) バーンカット( $B_E'$ )

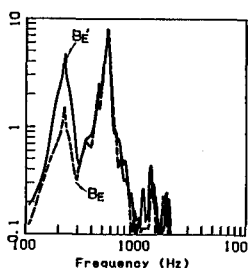


(b) バーンカット( $B_E$ )

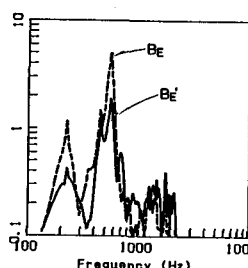
Fig. 6 発破振動波形例 (計測点No. 1)



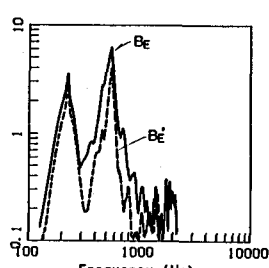
(a) 初段



(b) 2段



(c) 3段



(d) 4段

Fig. 7 発破振動フーリエスペクトル (2ch)

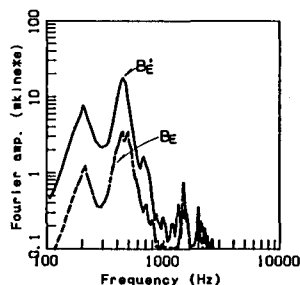


Fig. 8 初段発破振動フーリエスペクトル (計測点No. 2)

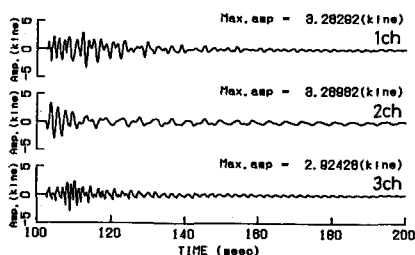


Fig. 9 初段発破振動波形例 ( $B_E'$ )

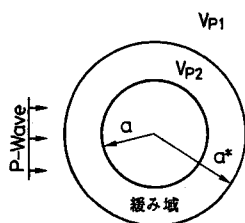


Fig. 10 解析モデル

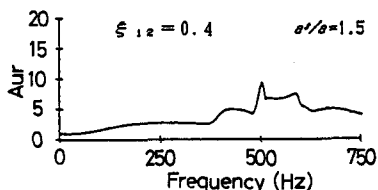


Fig. 11 局所的特性の増幅率

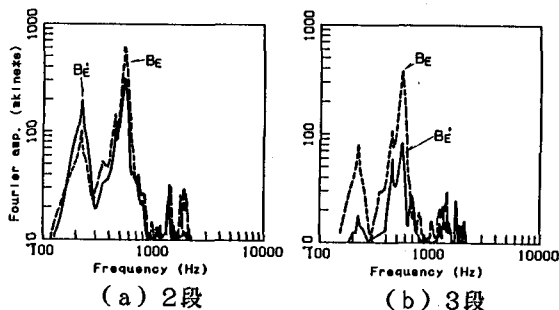


Fig. 12 震源スペクトル (2ch)

局所的特性が関係しているのではないかと考えられる。Fig. 9は、Fig. 6 (a) の初段部を拡大した図であり、100~120(ms)あたりは約500Hz、120(ms)以降は約220Hzの波が継続する。この220Hzの波は、センサーの取り付けに関係した共振である可能性が高いと判断でき、以降、検討の対象から外すことにする<sup>2)</sup>。

各計測点ごとの卓越周波数が異なるということは、各計測点付近の緩み域の幅と、健全な岩盤と緩み域の速度比が異なるためであるという考えに基づき、B坑道がFig. 10に示すような、緩み域を有する半径  $a$  の円形空洞とする。このFig. 10を解析モデルとした、緩み域が空洞の動特性に及ぼす理論解析結果<sup>3)</sup>をFig. 11に示す。なお、 $\xi_{12}$ は、緩み域と健全な岩盤の速度比 ( $V_{p2}/V_{p1}$ )、縦軸のAurは、局所的特性の増幅率である。Fig. 11とFig. 7, 8より、500Hzで卓越している計測点No. 1とNo. 2は、およそであるが、空洞半径を2mとすると、緩み幅が1.0m、緩み域の  $V_p$  が2400m/sと推測することができる。なお、他の計測点についても同様に推測することができる。

計測点No. 1における、発破  $B_E'$  と発破  $B_E$  の2, 3段発目の実測スペクトル (Fig. 7 (b), (c)) を、距離減衰を考慮し、震源スペクトルとして表すとFig. 12 (a), (b) のようになる。発破  $B_E'$  のほうが発破  $B_E$  と比べて、一孔当りの薬量が多いにもかかわらず、フーリエ振幅値が小さいことがわかる。なお、初段においては、両発破に顕著な差はなかった。つまり、EDDを使用しての岩盤が起こせたか否かが、初段以降の段発に現れていることがわかる。

## 5. おわりに

EDDを用いて、Vカットとバーンカットの振抜き発破実験・計測を実施し、その結果に基づいて、以下の内容の報告を行った。瞬発雷管を使用した発破よりも、EDDを使用した方が、最大振幅値が低減することがわかった。また、EDDを使用した発破振動波形において、岩盤が起きたか否かで初段以降の波形に違いがわかることがわかり、それについての検討を行った。

## 参考文献

- 1) 山本, 市川, 「EDDによる発破振動・音の予測と軽減」, 工業火薬, Vol. 49, No. 6, 1988
- 2) 谷瀬, 金子, 「地下空洞の動的応答特性」, 熊本大学修士論文, 1989
- 3) 金子, 伊藤, 「岩石内に発生するマイクロフラクチャーに関する研究」 材料, Vol. 26, No. 285, pp503-509, 1977