

## EDDによる発破振動・音の予測と軽減

山本雅昭\*, 市川 清\*

高秒時精度電気雷管(以下, EDDと略す)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。我々はEDDによる多数孔の時間差発破(段発発破)において生じるであろう発破振動・音を発破現場で測定した単発の波形より予測し、発破振動・音が最も小さくなる最適遅延秒時間間隔を決定する技術手法を確立し、その有効性を実証するために現場実験を行った。

その結果、以下の点が明らかになった。

- 1) 線型重ね合せの原理による発破振動・音の予測は可能である。
- 2) EDDにより予測に基づいた発破を行うことにより、発破振動の軽減を行うことができる。
- 3) 発破音の軽減には今後検討が必要である。
- 4) EDDを用いて各現場に最適かつ正確な時間間隔で発破することにより破砕効果を向上させることができる可能性がある。

### 1. 緒 言

EDDとはElectronic Delay Detonatorの略であり電子回路により秒時を設定する新しい高機能雷管である。この雷管の開発により、従来の延時薬燃焼方式の遅延手段をもつ雷管では考えられなかった高い秒時精度を実現することができた。この様な雷管の用途として発破振動の軽減、フラグメンテーションの改良などが知られ、海外においてはかなりの文献が発表されている<sup>1)</sup>。しかし日本においては製品の開発はかなり活発に行われてきたが、用途開発は殆ど行われていなかった。

そこで我々は、EDDの効果の中でも近年多くの発破現場で問題となっている発破振動・音の軽減効果に着目し、EDDによる発破振動・音の軽減方法の検討を行った。軽減方法とは、まずEDDによる多数孔の時間差発破(段発発破)において生じるであろう発破振動・音を、あらかじめ発破現場にて測定した単発発破(1孔だけの発破)よりいろいろな遅延秒時間間隔のもとに予測し、この中から発破振動・音が最も小さくなる最適遅延秒時間間隔を選択する。次いでこの結果に基づきEDDを作成、実発破を行い、軽減効果を確認するものである。

本報告ではEDDの概要と、EDDを用いた発破より発生する振動・音の予測方法並びに本予測方法の信頼性を確認するために行った現場実験及び本軽減方法を用いて行った軽減実験について報告する。

### 2. EDDについて<sup>2)</sup>

#### 2.1 EDDの構成

EDDの基本的な構成は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およ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専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。

#### 2.2 EDDの秒時精度

EDDと現行MS、DS電気雷管の秒時精度比較をTable 1に示す。各基準秒時における変動係数で見ると、EDDは、現行MS、DS電気雷管の約1/10の数値を示しており、秒時精度として10倍以上良いことがわかる。

#### 2.3 EDDの特性

EDDの各特性の評価値をTable 2に示す。従来の電気雷管として問題になるような耐水性能および耐静電気性能に加えて、EDDに電子回路を使用している

昭和63年9月2日受理

\*旭化成工業株式会社化薬研究所  
 〒882 宮崎県延岡市水尻町 304  
 TEL 0982-21-1217

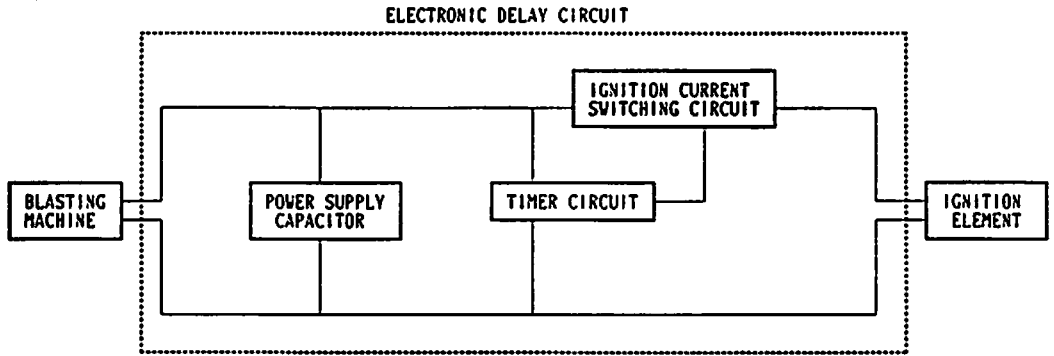


Fig. 1 Block diagram of EDD.

Table 1 Delay time data.

E D D				Pyrotechnic detonator			
Nominal time (ms)	Average time $\bar{x}$ (ms)	Standard deviation $\sigma$	$3\sigma/\bar{x} \times 100 \%$	Nominal time (ms)	Average time $\bar{x}$ (ms)	Standard deviation $\sigma$	$3\sigma/\bar{x} \times 100 \%$
20	19.74	0.23	3.49	20	19.63	1.54	23.47
40	39.88	0.44	3.31	40	40.64	3.07	22.69
100	99.67	0.84	2.53	100	100.82	3.09	17.52
200	199.02	1.04	1.57	200	205.84	7.63	11.12
500	503.82	1.33	0.79	500	457.25	11.59	7.01
1000	999.70	3.70	1.10	1000	1090.0	48.50	13.30

Table 2 Properties of EDD.

Test items	Test conditions	Results
Water proofness	20 kg/cm <sup>2</sup> , 5 hours	good
Static-electricity	2000 pF, 25 kv	non destructive
Drop impact	1.5 m, 250 rounds	non destructive
Vibration shock	50 gal, 40 Hz, 6 hours	non destructive
Thermal shock	-30°C ↔ 20°C ↔ 80°C, 10 cycles	good

ことから問題になるような耐衝撃性能、耐振動性能及び耐熱衝撃性能についても実用的に問題のない性能を有することがわかる。

### 3. 発破振動・音の予測方法

#### 3.1 予測に際しての仮定

装薬孔内で火薬が雷管により起爆されると火薬の爆発により強力な応力波が発生し、装薬孔壁面から岩盤中へ投射され、岩盤を破碎、減衰しながら伝播し、地盤を振動させる。また応力波の一部は岩盤中から空気中へ投射され、空気振動となって伝播する。1孔だけで発破した場合には以上の事が一度だけ起こるわけであるが、多数孔で段発発破を行った場合には、ある時間間隔で雷管の数だけ繰り返されることになる。こ

で次のような仮定を設けて発破振動・音の予測を試みることにした。

- A) 各装薬孔から発生する応力波は、穿孔、装薬条件及び伝播経路が同じであれば再現性を有する。
- B) 応力波の重ね合わせは線型重ね合わせの原理に従い、重ね合わせる際の遅れ時間は、雷管の起爆遅れ時間に等しいとする。よって、実際の発破において観測される振動及び音は、単発発破において観測される振動及び音が雷管の起爆遅れ時間に従い孔数分重なり合うことによって出来たものであるとする。
- C) 装薬孔と計測地点の二次元的配置による各孔

から発生する応力波の伝播所要時間の違いや、岩石の破壊による応力波伝播特性の変化などによる応力波の変化は考慮しない。

### 3.2 発破振動・音の評価方法

予測される発破振動・音の人体および構造物への影響を評価するために Table 3 に示す値を用いた。

振動レベルは一般に(1)式のように表される。

$$VL = 20 \log_{10}(A/A_0) \quad (1)$$

ここで  $A$  ( $m/s^2$ ) は加速度実効値、 $A_0$  は振動の振動数により決まる基準値で、発破振動の周波数を  $9 \sim 80$  Hz と仮定すれば、 $A_0 = 0.125 \times 10^{-5} f$  ( $m/s^2$ ) となる。また振動加速度実効値  $A$  と振動速度実効値  $V$  との間には(2)式のような関係が成り立つから、 $A/A_0$  は(3)式の形で表されることになる。

$$A = 2\pi f v \cdot 10^{-2} \quad (2)$$

$$A/A_0 = (2\pi f v \cdot 10^{-2}) / (0.125 \times 10^{-5} f) = V / (2.0 \times 10^{-5}) \quad (3)$$

よって(1)式は

$$VL = 20 \log_{10}\{V / (2.0 \times 10^{-5})\} \quad (4)$$

となり、振動速度実効値より近似的に求めることができる。

また、振動速度実効値は、振動速度波形を  $V(t)$  とすれば、次式より求められる。

$$V = \sqrt{\int_{t_1}^{t_2} v(t)^2 dt} / (t_2 - t_1) \quad (5)$$

B

今回は、積分時間 ( $t_2 - t_1$ ) を 1 秒として計算を行った。

次に、総エネルギーレベルは、一般に次式により与えられる。

$$TEL = 10 \log_{10} \left\{ \int_{t_1}^{t_2} P^2 / P_0^2 dt / (t_2 - t_1) \right\} \quad (6)$$

ここで、 $P$  (bar) は測定された音圧、 $P_0$  は基準音圧で  $P_0 = 2 \times 10^{-10}$  (bar) である。今回は、音圧として低周波音レベル計 RION NA-17 の SPL 特性により測定した音圧を用いた。この周波数特性は  $1 \sim 1000$  Hz が平坦応答である。また、積分時間 ( $t_2 - t_1$ ) は振動レベルの場合と同じく 1 秒とした。

### 3.3 単発波形の測定

予測に対して一番重要なデータとなるのが単発波形である。この波形は、爆薬の種類、装薬量、穿孔径、抵抗線、切羽と測点の間の地盤の影響等を全て含んだものであると考えられるから、測定に際しては、本発破と全く同じ発破条件で単発発破を行う必要がある。測定項目は振動速度と音圧レベルで、Fig. 2 に示すようなブロックダイアグラムで測定することとした。測定に際し使用した機器は、振動速度ピックアップとして国際機械振動研究所 VP-3144D、直流増幅器として日本電気三栄 6L02、低周波音レベル計としてリオン NA-17、データレコーダーとしてティアック MR-30 を用いた。なお、低周波音レベル計 NA-17 については周波数特性として前出のように SPL 特性を用いた。

### 3.4 予測、解析手順

発破振動・音の予測および解析手順を Fig. 3 に示す。解析条件としてデッキ装薬の有無、段発数、遅延秒時間隔の初期値および刻み幅、雷管の秒時精度、測定条件、そして単発波形のサンプリングデータを必要とする。これらの条件のもとにコンピュータを用いて単発波形を重ね合わせ、各遅延秒時間隔における評価値を算出し、軽減目的に最も適した遅延秒時間隔を選択し、EDD の遅延秒時間隔とする。この解析結果に

Table 3 Evaluation method of vibrations and airblasts.

	For Structure	For Human
Vibrations	Peak particle velocity	Vibration level
Airblasts	Peak sound pressure level	Sound exposure level

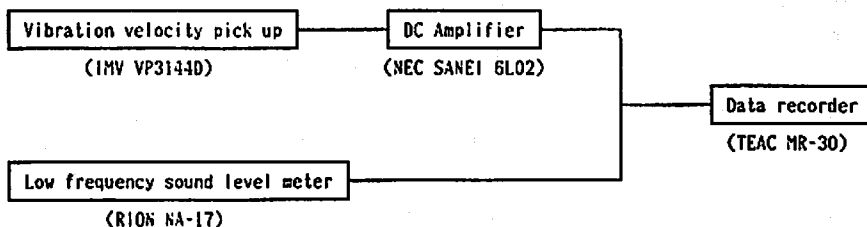


Fig. 2 Block diagram of measurement.

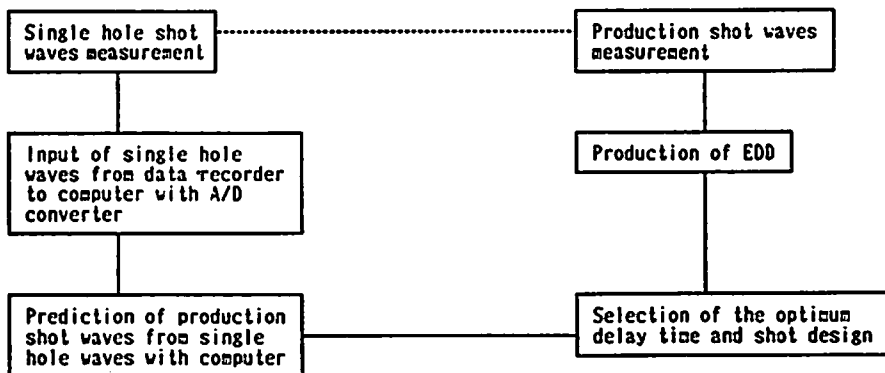


Fig. 3 Schematic diagram of production shot waves prediction and control system.

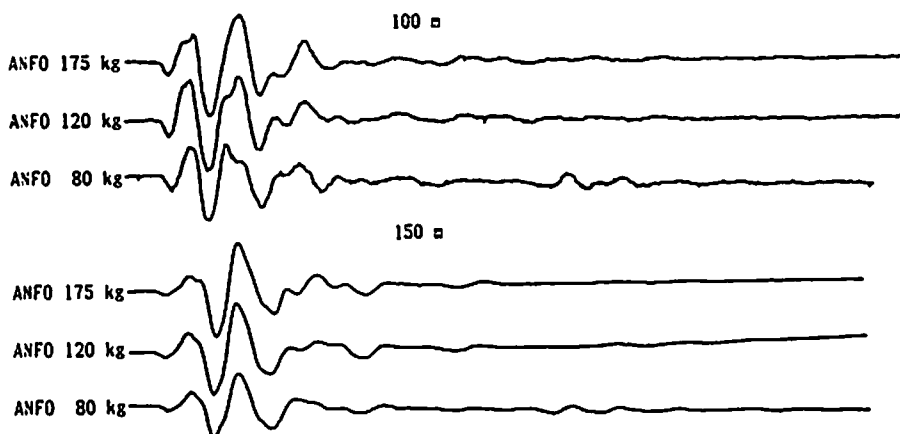


Fig. 4 Seismograms recorded for three different charge weights at two locations.

に基づいてEDDを製作し、現場確認実験を行う。必要であれば、この手順を繰り返す。

#### 4. 信頼性確認実験

##### 4.1 単発発破により発生する振動の再現性

石灰石鉱山において単発波形の再現性を確認するために、同一切羽にて一孔当りの装薬量を175kgと120kg、80kgに変化させて100mと150m地点で垂直方向振動の測定を各1回行った。同一距離の波形を三つ並べてFig. 4に示す。これより、爆薬の種類、穿孔径、抵抗線、測定点が等しければ波形はほぼ等しくなること、装薬量は波形の振幅に影響してくることがわかる。また波形は、発破条件よりも測定点の位置により決定されるものと思われる。

##### 4.2 予測波形と実測波形の対比

予測プログラムを用いて単発波形より予測した結果と実際にEDDを用いて発破した結果がどれくらい一致するかを、砕石場にて行ったEDD発破結果より評価した。Fig. 5は、20ms間隔5孔で発破したときの

振動および低周波音の予測波形と実測波形を対比したものである。これより、振動および低周波音ともによく予測されているのがわかる。特に低周波音の場合に良く一致している。これは媒質である空気が地盤に比べて極めて均質であること、振動のように前段の影響を受けないことによるものと思われる。

次に、他に行った35ms及び50ms間隔5孔のEDD発破結果も合わせて最大値、レベル値の予測と実測の対比結果をTable 4に示す。( )内は予測率で予測値を実測値で割ったものに100を掛けたものである。よって100に近いほど良く一致していることになる。これより、一番悪いもので約20%の違い(50ms間隔、最大振動速度の場合)があるが、全般的に良く予測できている。特に低周波音の場合には、予測率平均101.5%、標準偏差1.38%と大変精度良く予測できている。この原因としては、前出のように、媒質が空気であるということの他に、評価に対しデシベルを用いていることも大きな要因と考えられる。振動の場合には最大

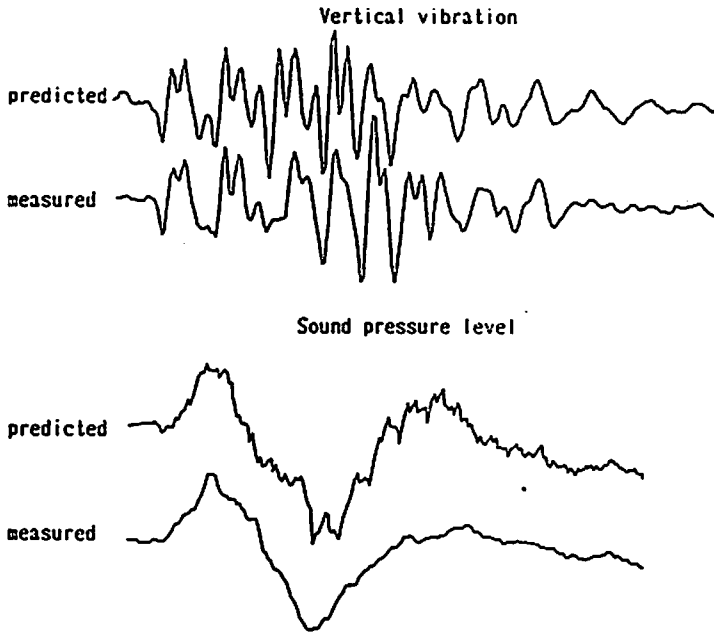


Fig. 5 Comparison of predicted and measured seismograms and airbrasts for a five hole shot with 20 ms intervals.

Table 4 Comparison of predicted and measured values for three five hole shots.

Delay time (ms)	Vibrations				Airbrasts			
	Peak particle velocity (kine)		Vibration level (dB)		Peak sound pressure level (dB)		Sound exposure level (dB)	
	Predicted	Measured	Predicted	Measured	Predicted	Measured	Predicted	Measured
20	0.296 (88.1)	0.336	66.6 (100.6)	66.2	102.1 (100.6)	101.5	91.7 (103.4)	88.7
35	0.301 (100.0)	0.301	65.6 (98.5)	66.6	99.2 (102.1)	97.2	87.1 (102.4)	85.1
50	0.296 (80.4)	0.368	67.0 (99.9)	67.1	99.1 (99.5)	99.6	88.1 (101.4)	86.9

振動速度のばらつきが大きく、予測が低周波音の場合ほど精度良くできていない。今後、最大振動速度の信頼性を向上させる方法を考える必要がある。

### 5. 発破振動・音軽減実験

今回開発した発破振動・音の予測軽減方法に基づき、実際に石灰石鉱山において軽減実験を行った。この現場では従来 Table 5 に示す発破設計で DS 電気雷管の 1, 3, 5 段または 2, 4, 6, 段を用いて段当り 3 ~ 4 孔を斉発し、全 10 孔程度で発破を行っている。そこで我々は、EDD とデッキチャージを併用して発破振動・音の軽減及び薬量原単位の軽減を試みた。

#### 5.1 単発波形測定結果

まず予測に必要な単発波形の測定を行った。今回は

デッキチャージも併用して軽減を行うということで、Table 6 に示す発破設計で、上段と下段に 600ms の秒時差を設けて単発波形の測定を行った。また同時にデッキチャージ採用による軽減効果を見るために、現行発破設計でも単発波形の測定を行った。結果を Table 7 に示す。この結果をみる限りでは、かえってデッキチャージを用いた方が振動及び低周波音共に大きくなっており、デッキチャージによる段当りの薬量減少に伴う軽減効果はみられない。この原因としては、破碎状況が振動及び低周波音の発生に大きく影響していると考えられ、この様な実験でデッキチャージによる効果を判断するのは困難であると考えられる。

#### 5.2 遅延秒時設計

Table 5 Laying out of conventional blast.

Hole depth	Inclination	Hole diameter	Burden	Spacing	Explosive	Detonator
18.5 m	70 °	165.0 mm	6.5 m	7.0 m	Column charge, ANFO 175 kg each hole	DS-1,3,5 or DS-2,4,6

Table 6 Laying out of EDD blast.

Hole depth	Inclination	Hole diameter	Burden	Spacing	Explosive	Detonator
18.5 m	70 °	165.0 mm	6.5 m	7.0 m	Deck charge, ANFO, Upper 37.5 kg Bottom 112.5 kg each hole	EDD

Table 7 Results of single hole shot measurement.

Laying out of blasting	Dist. from face (m)	Peak particle velocity (kine)	Peak sound pressure level (dB)
Conventional blasting,	100	1.034	128.0
	150	0.435	122.9
EDD blasting with deck charge	100	1.200	130.5
	150	0.525	127.6

Table 8 Optimum delay times and results of prediction.

Subject of reduction	Optimum delay time (ms)		predicted values			
	Between decks	Between holes	Peak particle velocity (kine)	Vibration level (dB)	Peak sound pressure level (dB)	Sound exposure level (dB)
Vibration	15	20	1.228	80.5	140.5	128.0
Airbrast	30	50	1.868	90.9	140.3	125.6

デッキ単発発破より得られた単発波形を用いて遅延秒時設計を行った結果、Table 8に示す最適遅延秒時間隔と各評価値が得られた。これより、振動については現行発破に比べて最大振動速度で約半分、振動レベルで7dB近く軽減できると予測された。しかし低周波音については、波形の立上りが早く且つ一番大きいピークを示すため、実発破における最大音圧レベルを単発発破のそれ以下に軽減することはできないであろうことが予測された。また総エネルギーレベルについても殆ど軽減の効果が得られないことが予想された。これは、測定点が切羽から100mと大変近いところであったために、音の場合には振動ほど波の立上りが鈍らなかつたことによると思われる。

### 5.3 軽減確認実験

Table 8の遅延秒時設計結果に基づきEDDを作成し、振動・音のそれぞれの場合について軽減確認実験を行った。結果をTable 9に示す。なお( )内は予測結果を示したものである。これより各値とも予測値に近い値が得られているのが分かる。振動については振動レベル、音については総エネルギーレベルが良く一

致しており、波形の予測がうまく行われていることを示している。しかし、最大振動速度および最大音圧レベルについては多少の差異がみられる。この中で最大音圧レベルの差異については、今回測定に使用した低周波音レベル計の周波数特性が1~1000Hz平坦特性であるため、音圧の鋭い立上りが十分とらえきれていないことによるものと考えられる。

### 6. 結 言

以上により、次の結論が得られた。

- (1) 単発発破において発生する振動および音は、再現性を有し、振動の場合その波形は計測位置の影響を大きく受ける。また、振幅は薬量と相関関係がある。
- (2) 単発発破の再現性と波の重ね合せの原理を利用して実発破において発生する振動及び音を正確に予測することができる。
- (3) EDDを用いて予測に基づいた発破を行うことにより、発破振動を目的通り軽減することができる。
- (4) 発破音の軽減には今後さらなる発破工法上の検討が必要である。

Table 9 Results of reduction confirmation test.

Laying out of blasting	Dist. from face (m)	Vibrations		Airblasts	
		Peak particle velocity (kine)	Vibration level (dB)	Peak sound pressure level (dB)	Sound exposure level (dB)
Conventional	100	2.000	86.7	141.7	128.4
Conventional	100	2.628	88.3	143.7	126.1
EDD for vibration reduction	100	1.031 (1.228)	79.8 (80.5)	144.4 (140.5)	128.8 (128.0)
EDD for airblast reduction	100	2.077 (1.858)	89.5 (90.9)	138.9 (140.3)	125.7 (125.6)

(5) EDD及びデッキチャージを併用することにより、一発破当りの全装薬量を約15%軽減することができた。このことは、各現場に最適かつ正確な遅延秒時間隔を持つ雷管により発破することが岩石破砕に対してより良い影響を与えることを示唆しているものと考えられる。

文 献

1) 例えば

Douglas A. Anderson, Stephen R. Winzer and Andrew P. Ritter, Proc. 8th Annual Conference on Explosives and Blasting Techniques, pp69-89 (1982)

2) 栗原, 愛甲, 坂元, 篠崎: 工業火薬協会誌48巻3号 pp183-188 (1987)

3) 山本, 富山, 原口, 愛甲: 工業火薬協会昭和63年春季研究発表講演会要旨集 pp39-40 (1988)

## Prediction and Control of Ground Vibration and Airblast from Bench Blasting Designed with EDD

by Masaaki YAMAMOTO\*, Kiyoshi ICHIKAWA\*

The development of high accuracy delay detonator have enabled to blast with precision timing. We have developed a method for predicting ground vibrations and airblast from bench blasting designed with electronic delay detonator (EDD), one of the high accuracy delay detonator.

In this method, single hole shot waveforms are superposed with various delay intervals based upon linea superposition, and the optimum delay interval is selected accordance with predicted results.

In this report, the reliability of this method was tested and the following conclusions were obtained.

- 1) It is possible to predict ground vibrations and airblasts from production shot by means of linea superposition.
- 2) It is possible to control ground vibrations by means of EDD and predicted optimum delay interval.
- 3) More developments about blasting method are necessary to reduce airblasts.
- 4) There is a good possibility that EDD and predicted delay interval will produce good fragmentation.

(\*Industrial Explosives Section, Explosives' Laboratory, Asahi Chemical Industry CO., LTD., 304 Mizushiri, Nobeoka-shi, Miyazaki, 882)

---