

- 3) 日野 熊雄:同上 Vol.11
- 4) H. P. Stout: Nature Vol.166
- 5) E. Jones: Proc. Roy. Soc., A 523
- 6) E. Jones, H. P. Stout: Coll. Eng., Oct. & Nov. ('48)
- 7) 木下 四郎:工火協 Vol. 15,16,17

- 8) 加藤 清祝 同上 Vol. 20
- 他に W. Dixon, F. J. Massey Introduction to Statistical Analysis (Mc Graw-Hill)

第9回品質管理シンポジウム論文集に一部発表  
1960年春期火薬協会研究発表会で発表した。

### Series Firing of Electric Detonators

Teruhiko Suzuki, Kazumoto Yamamoto, Yasutosi Wasio

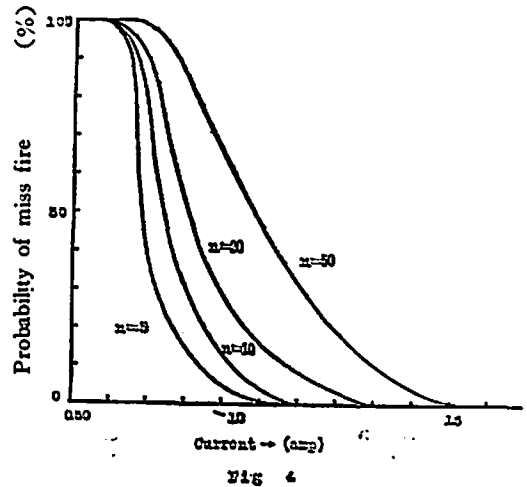
It is said that the excitation time and the breaking time of bridge wire of electric detonators are normally distributed at any given current.

Measuring these times, we confirmed through our experiments that each distributions are normal, then obtained mean excitation time and breaking time of bridge wire and their variances to compute the probability of miss fire at series firing of electric detonators by means of Monte Carlo method.

Now, if the excitation time  $X$  and the breaking time of bridge wire  $Y$  comply normal distribution  $N(\mu_x, \sigma^2_x)$ ,  $N(\mu_y, \sigma^2_y)$  respectively, miss fire should occur at series firing of  $n$  electric detonators whenever following equation is given :

$$\left\{ \max_{1 \leq k \leq n} X_k > \min_{1 \leq k \leq n} Y_k \right\}$$

The probability of miss fire  $\alpha$  is written as follow :



$$\begin{aligned} \alpha &= P_r \left\{ \max_{1 \leq k \leq n} X_k > \min_{1 \leq k \leq n} Y_k \right\} \\ &= P_r \left\{ \max_{1 \leq k \leq n} X_k - \min_{1 \leq k \leq n} Y_k > 0 \right\} \end{aligned}$$

So  $\alpha$  is the function of the firing current and the number of electric detonators and the result is shown in above figure.

### MS遅発発破による地震動

名和小太郎・菅田 博\*

まえがき

発破により、爆破エネルギーの一部は、発破点近傍

の破砕領域をこえて、弾性波エネルギーとして、周囲の媒質中に伝播してゆく。この弾性波は、発破点周辺の構造物に震動をあたえ、場合によっては、それに損傷をあたえる。それゆえ、実際の見地よりすれば、こ

昭和36年11月14日受理

\* 旭化成工業株式会社 技術研究所 東京都板橋区

のような震動をなるべく小さくおさえることが要求される。しかし、このために装薬量を小さくすることは、発破の主要目的である破碎効果をひくめることになるから、これをさげなければならない。ここにゆるされる手段は、したがって、爆薬エネルギーから弾性波エネルギーへの変換率を、すなわち震動効果を、できるだけ小さくすることである。

この震動効果は、第一に、爆薬に固有の性質にしたがつて変動する。しかしこれまでに発表された若干の報告によれば、この効果はあつてもわずかなものであり、これに期待をかけることはできない。震動効果は、第二に、発破方式により変動する。この場合、これは、MS 遅発発破とよばれる発破方式においてきわめて小さくなることが知られている。この点からすれば、ここにあたえられる主題は、MS 遅発発破のこの側面を、さらにすぐれたものに開発してゆく、ということになろう。

現状においては、しかし、このMS 遅発発破による震動減少効果は、単に現象的に知られているにとどまり、理論的に説明づけられるにいたっていない。そのため、この効果を利用する場合でも、その効果を最大にするためには、どのような段差どのような段数をえらぶべきか、という点になると、なお確定した指針がえられない。この報告の目的は、このような指針を用意することにある。このためには、まず、これまでの諸仮説を再整理し、次に、これらを検討するための実験をこころみる。さらに、この実験にたえた仮説を理論的にふかめ、最後に、このようにして構成された理論を現場において意識的に適用する、という順序で考察がすすめられる。

MS 遅延発破は、ここにのべる震動減少の効果以外に、破碎現象においても、岩石の破碎粒度、飛散距離などに対して、特徴的な効果をもっている。しかし、この報告で最適とする方式が、他の破碎現象に対しても最適であるかどうかはわからない。これは、別の、また、この報告にひきつづく研究題目となろう。

#### 1 諸仮説の再整理

MS 遅発発破による波動減少効果（以下 MS 効果と略称）については、これを説明する仮説が3種類ある。これらを、ここでは、反結合説、分割説、および干渉説とよぶことにする。反結合説は、Leet (1949)<sup>1)</sup>、D' Anselm<sup>2)</sup>、Deffet et al.<sup>3)</sup> などが、分割説は、Hartmann et al.<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup>、Leet (1960)<sup>6)</sup> などが、干渉説は、Morris<sup>7)</sup>、Fish<sup>8)</sup>、Langefors et al.<sup>9)</sup>、<sup>10)</sup> などが、それぞれ主張したものである。これらの諸仮説は、いろいろな表現をもっているので、ここでは、それと

をそのままの形で列挙することはさげ、整理した形にしめすことにする。

ある発破において、その装薬量を  $D$  としよう。いま、震動の媒体である岩石に注目して、これからみれば、この  $C$  は発破の瞬間にのみ衝撃的にみとめられる量、すなわち、時間的に変動する量であり、それゆえ  $C(t)$ 、と表記できる。次に、この  $C(t)$  によつて媒体中に発生する震動波形を  $u(t)$  としよう。この場合、われわれは、図1-aのような原因—結果の系をかんがえることができる。ここでは、これを

$$C(t) \rightarrow u(t)$$

と表現することにしよう。

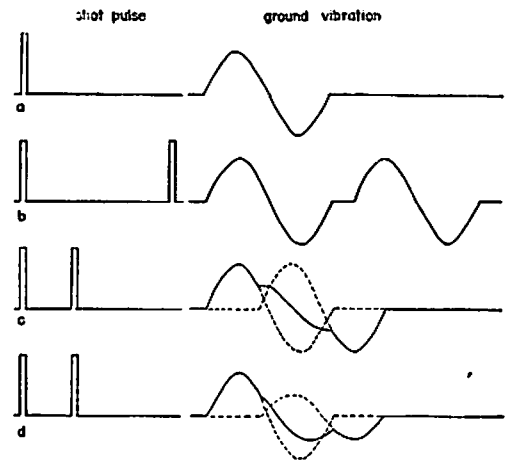


Fig. 1 Schematic relation between shot pulse and ground vibration

- (a) single shot
- (b) delay shot — division theory
- (c)     >     — interference theory
- (d)     >     — decoupling theory

MS 効果とは、図1aのような系がいくつか存在する場合、その相互作用がしめす効果である。以下、簡単のため、2段のMS 発破、すなわち、2つの系の相互作用をかんがえよう。ここで、第1および第2の系に対する装薬量を  $C_1(t)$ 、 $C_2(t-dt)$ 、震動波形を  $u(t)$ 、 $u_2(t-dt)$  としよう。ただし、 $dt$  は、 $C_1$ 、 $C_2$  があたえられる時刻の差である。このような2つの系がある場合、かんがえられるべきことは、第一に、これら2つの系の間に相互作用があるかどうかということであり、第二に、相互作用のあるとき、その作用が線型性を保証するかどうかということである。いま  $C_1$  と  $C_2$  らの作用で生ずる震動の合成波形を  $v(t)$ 、とし、この

いた。岩質は割目のおおい石灰岩であつた。

$v(t)$ が上のそれぞれの場合にどのようになるかを、われわれの表記法にしたがつてしめすと、

1. 相互作用のない場合 (図1-b)  
 $v(t) = u_1(t)$  あるいは  $u_2(t-dt)$
2. 相互作用のある場合
  - 2-1 相互作用が線型の場合 (図1-c)  
 $v(t) = u_1(t) + u_2(t-dt)$
  - 2-2 相互作用が線型でない場合 (図1-d)  
 $v(t) = R_1(t) \cdot u_1(t) + R_2(t) \cdot u_2(t-dt)$ ,  
 $R_2(t) \leq 1$

となる。1が分割説、2-1が干渉説、2-2が反結合説のしめす内容となるわけである。

## 2 実験

1にしめした諸仮説の適応性とその限界を実験的に検討するため、61年5月に、電気化学工業青海工場(新潟県西頸城郡)において、実験がこころみられた。

### (1) 現場の状況

実験場には東山第5グローリーをえらんだ。その規模は、巾150m、高度差150m、平均傾斜 45° 程度であつた。実験用切羽は、グローリー内壁に6点もうけられたが、それらは、かなりの範囲にわたつて散在して

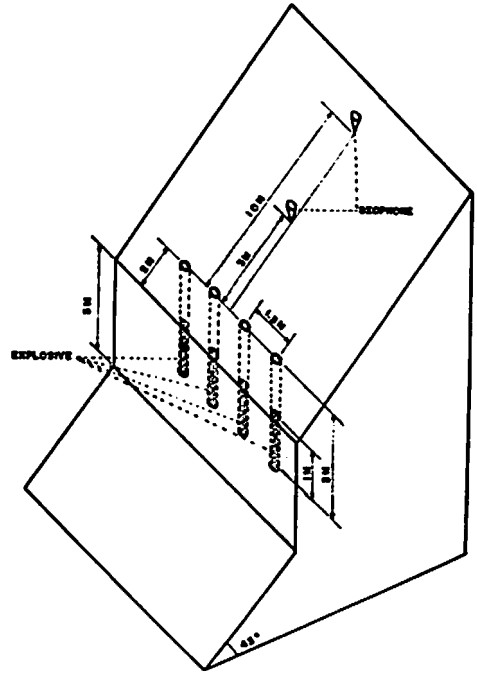


Fig. 2. Experimental quarry face

Table 1 Conditions of experiment

Blast No.	Charge weight	Delay time	Trace 1		Trace 2		Trace 3		Trace 4	
			distance	component	distance	component	distance	component	distance	component
1	kg 0.9×4	msec 0	m 1	Vertical	m 3	vertical	m 5	vertical	m 10	vertical
2	"	30	10	"	10	transverse	"	"	5	transverse
3	"	10	"	"	"	"	"	"	"	"
4	"	200	"	"	"	"	"	"	"	"
5	"	0	"	"	"	"	"	"	"	"
6	"	10	"	"	"	"	"	"	"	"

### (2) 実験方法

測定器としては、ピックアップにHTL製のS-36速度型地震計(固有振動数20cps)を、記録器に三栄製の100-B型電磁オシロ(固有振動数800cps)を使用した。ピックアップは記録器に直結された。測定器の総合特性は、30cps以上で平坦な出力をしめた。

ピックアップは、上下動および水平(左右)動がとれるように設置された。発破孔からの距離は、主として斜面上にそつて5mおよび10mであつた。

発破回数は6であつた。各発破ごとに、発破孔数は4、装薬量は900×4g、薬種は旭化成製桂ダイナミトであつた。

起爆方式には、瞬発、遅発のいずれもがとられた。遅発の場合、発破は、遅発雷管によつて、発破孔列の一端から段順になされた。遅発段差は10msec、30msecおよび200msecであつた。段差30msecは通常のMS遅発に、段差200msecは通常のDS遅発に、それぞれ対応するものである。

ここで、実験方式の概略を図2に、実験条件の詳細を表1にしめす。

### (3) 実験結果

測定記録を図3にしめす。以下の解析は上下動に對するものにかぎる。(水平動は、別の目的のためにとられた。)

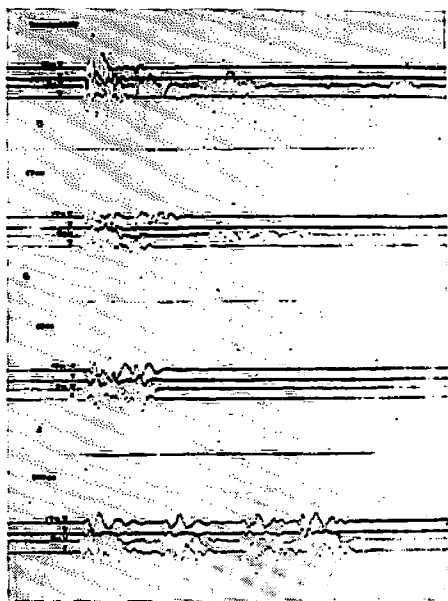


Fig. 3 Examples of seismo grams of experiment

- (5) instantaneous blasting
- (6) 10msec blasting
- (7) 30msec blasting
- (8) 200msec blasting

ここでは、この実験結果が、どの程度にMS効果をしめしているかを、現象的に検討してみることにする。

まず、各発破によっておくり出された震動のエネルギーを比較してみよう。いま、発破点から震動波が球対称的に放出されたとすると、そのエネルギー  $E$  は、波の放出方向に垂直な単位面積あたり

$$E = \rho V \int_0^{\infty} u(t)^2 dt$$

であえられる。ここで、 $\rho$  は媒体の密度、 $V$  は震動波の伝播速度である。なお、震動のふれはじめる時刻を  $t=0$  とする。さて、実験記録における上下動のトレースを  $u(t)$  として上式に代入すれば、その  $u(t)$  に対するエネルギーが算出される。いま、各発破に対してこの値を計算し、それを第1の瞬発に対する値に対して基準化すると、表2のようになる。(受震距離 10m における値のみしめす。5m におけるものはトレースがふりきついているものがあるので比較できない。) この結果は、エネルギー値が瞬発の場合に大きく、遅発の場合に小さいこと、また、おなじ遅発でも、段差が小さいほど小さいこと、をしめしている。

次に、各発破においておくりだされた震動波の最大

粒子速度を比較してみよう (Crandell<sup>11)</sup>, Köhler<sup>12)</sup> Langefors et al<sup>10)</sup> などによれば、構造物の震害はこの物理量によって決定されるので、この量の大小が実際に意味があるわけである)。いま、この値をエネルギーの場合と同様にして計算すると、2表のようになる。ただし段差 200msec の発破における値は、その第1段に対するものである。この結果は、最大粒子速度も、エネルギーとおなじ傾向をもっていることをしめしている。

Table 2 Results of simultaneous and delay blasting

Blast No.	Delay time	Vibrations	
		total energy	maximum amplitude
	msec		
1	0	1.00	1.00
2	30	0.17	0.30
3	10	0.09	0.16
4	200	0.27	0.21
5	0	1.01	1.00
6	10	0.10	0.21

なお、実験条件のひとしい No.1 と No.5、また、No.3 と No.6 とにおいては、エネルギーも最大粒子速度も、そのしめす値が略ひとしい。これから、この実験が、よい再現性をもつものであるといえよう。

### 3 諸仮説の実験結果との対比

第1にしめした諸仮説のうち、どれが第2の実験結果と照合するか、ここにその検討をこころみよう。

第一に、分割説の適否についてしらべてみる。もし、この説が成立すれば、ひきつづく段の波形に相互作用のないとき、すなわち、各段の波形が分離しているとき、波形振幅が最小になるわけである。いま6個の実験記録を比較してみると、各段の波形が分離している No.4 の振幅は、瞬発の場合に比較すれば大きく減少はしているが、しかし最小ではない。むしろ、各段の波形に相互作用のある短段差の場合の方が小さい。この点、分割説は、MS効果のすべてを説明するものではない。注意すべき点は、分割説では、MS遅発発破を DS または HS 遅発発破と区別できないことである。分割説の効果は、段差が震動継続時間より大きな場合につねに存在するからである。この結論は Hartmann et al.<sup>9)10)</sup>, Leet (1960)<sup>11)</sup> などのそれと相違するわけであるが、しかし彼等の実験においても、その遅発段差をより小さくしたならば、あるいはわれわれとおなじ結論がえられたかもしれない。この点、

彼等の実験は不十分であつたといえる。

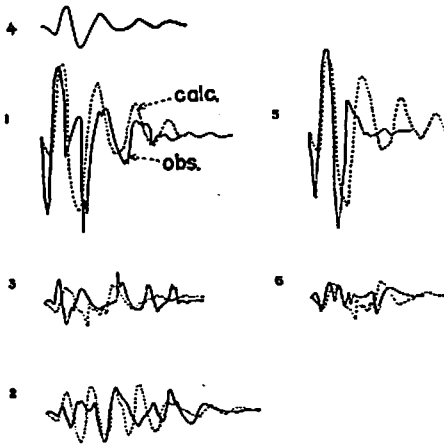


Fig. 4 Superposition of vibration based on interference theory

- (4) single blasting
- (1) instantaneous blasting
- (5)  $\nearrow$
- (3) 10msec-delay blasting
- (6)  $\nearrow$
- (2) 30msec-delay blasting

次に、干渉説と反結合説の適否についてしらべてみよう。もし、波形のかさなりかたが線型であつたら前者が、そうでなかつたら後者がただし。いま、No. 4 の第 1 段の波形を  $u(t)$  とし、単位装薬量からおくりだされるものとしてしよう。この場合、波形のかさねあわせが線型であれば、 $4u(t)$  は No. 1 および No. 5 の波形と、 $\sum_{i=0}^3 u(t-i \cdot 10^{-2})$  は No. 3 および No. 6 の波形と、また、 $\sum_{i=0}^3 u(t-i \cdot 3 \times 10^{-2})$  は No. 3 の波形と、それぞれひとしくなるはずである。このかさねあわせを図式的にした結果が図 4 である。点線が計算波形値、実線がこれに対応する現実の波形である。図 4 によると、計算した波形と実際のそれとは完全には一致しない。しかし、ひとつひとつの山谷の位相のズレは無視し、振巾の包絡線を比較してみると、計算と実際とはかなりの程度まで一致しているとという。しかも、この計算では、各回の発破が、すべて No. 4 の  $u(t)$  を基本波形としてもつことを仮定しているが、この仮定は、各実験切羽をかならずしも同一条件にはとれなかつたことをかんがえれば、正確には保証されないわけであり、この点、計算と実際とのくいちがいは実験誤差といえるかもしれない。この場合、反結

合説がいう効果が存在すれば、実際の値は図 4 の計算のそれよりさらに小さくなつたはずである。以上の推論から、干渉説によつて MS 効果がかなりの程度まで説明ずけられることがわかる。

しかしながら、図 4 の不一致は、反結合説が成立する可能性をもふくんでいる。だが、上にのべた推論からして、この説でしめされる効果は、存在してもわずかなものにすぎないであろう。なお、反結合説は、現在においても明確な形でしめされていないため、ここでこれ以上その内容に立ちいることはできない。

以上を整理すると

- (1) 分割説は、遅発発破における震動減少の効果をある程度までは説明しうるが、しかし、この効果が特に MS 発破において顕著になることは説明できない。
- (2) 反結合説は、この効果の一部分を説明しうる可能性をもつが、しかし、その機構の具体的な像をしめすことができない。
- (3) 干渉説は、この効果について、その大部分を説明できる。

この結論は、MS 効果をより有効なものとするためには、干渉説の立場でこれをふかめてゆかなければならないことをしめしている。

ここまでの議論においては、MS 発破では震動は減少しても破砕効果は不変である点が暗黙のうちに仮定されてきた。干渉説の立場をとれば、この仮定は満足される。なぜならば、この説は、発破点からやや離れた弾性領域中では震動がかさなりあうが、発破点極近傍の破砕領域中での衝撃波は各段ごとに独立して作用する、ということをも前提としているからである。

#### 4 干渉説の理論化

ここで、干渉説の理論化をこころみよう。干渉説は、その内容を解析的に表示すると

$$v(t) = \sum_{i=0}^{N-1} C_i u(t-idt) \quad (1)$$

となる。ここで、 $v(t)$  は MS 効果により変形された震動波形、 $u(t)$  は単位装薬量による震動波形、 $N$  は段数、 $t$  は段差、 $C_i$  は  $i$  段目の装薬量、 $m$  は定数である。

式(1)の内容は、

- (1) 波形をしる： $u(t)$
- (2) 段差をつける： $u(t-idt)$
- (3) 段数をかさねる： $\sum_{i=0}^{N-1} u(t-idt)$

の 3 段階となり、しかもこの順序はいれかえることができない。それゆえ、式(1)にしたがうかぎり、 $u(t)$  がことなるたびに、第 2～3 段の複雑な計算をしなければならない。この難点をさけるため、これまでの干渉説においては、 $u(t)$  を特定のものとして仮定して計算をし

ている。しかしながら、現実の $u(t)$ は、発破条件のこととなるごとく大きく変動するものなのである。この点、これまでの干渉説は一般的であるとはいいがたい。それゆえ、ここでは、これまでの干渉説における上の制限をのぞき、任意の $u(t)$ に対する一般的な干渉説を、あたらしくしめすことにする。このための理論は、地震探鉱におけるフィルター理論 (Swartz et al<sup>13)</sup>によるSampling filter, Jones et al<sup>14)</sup>によるdelay line filter, Sarit et al<sup>15)</sup>によるmoveout filterなど)にそつて構成される。

さて、任意の孤立波形 $\phi(t)$ は

$$\phi(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi(\omega) \exp(j\omega t) d\omega \quad (2)$$

で表現される。ここで、 $\Phi(\omega)$ は $\phi(t)$ の周波数スペクトルであり、

$$\Phi(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) \exp(-j\omega t) dt \quad (3)$$

とあらわされる。式(2)は、すべての $\omega$ について $\Phi(\omega)$ がわかれば、 $\phi(t)$ を決定できることをしめしている。それゆえ、 $\phi(t)$ の変動は、これを周波数領域における $\Phi(\omega)$ の変動におきかえて追跡することができる。

ここで、式(1)を周波数領域にうつすことをこころみよう。この場合、第 $i$ 段の波形 $C_i^m u(t-idt)$ に対する周波数スペクトル $U(\omega)$ は

$$U(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} C_i^m u(t-idt) \exp(-j\omega t - i\omega dt) dt$$

また、合成波形 $v(t)$ に対する周波数スペクトル $V(\omega)$ は

$$V(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \exp(-j\omega t) dt$$

となる。したがつて、周波数領域において式(1)に対応するものは、

$$V(\omega) = K(\omega) \cdot U(\omega) \quad (4)$$

$$K(\omega) = \sum_{i=0}^{N-1} C_i^m \exp(j\omega i dt) \quad (5)$$

となる。なぜならば、

$$\begin{aligned} V(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} v(t) \exp(-j\omega t) dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{i=0}^{N-1} C_i^m u(t-idt) \exp(-j\omega t - i\omega dt) \\ &\quad \times \exp(-j\omega i dt) dt \\ &= \left[ \sum_{i=0}^{N-1} C_i^m \exp(-j\omega i dt) \right] \end{aligned}$$

$$\times \int_{-\infty}^{\infty} u(t-idt) \exp(-j\omega t - i\omega dt) dt$$

であるからである。さて、式(4)は、 $U(\omega)$ を入力、 $V(\omega)$ を出力とすれば、伝達函数 $K(\omega)$ のフィルターをしめすものとなる。すなわち、MS効果をフィルター効果とみなしうるわけである。式(4)および式(5)によれば、このMSフィルター効果 $K(\omega)$ は、 $C_i$ 、 $N$ 、 $dt$ 、 $\omega$ によつて決定され、 $U(\omega)$ したがつて $u(t)$ とは無関係であることがわかる。このようにして、MS効果は、 $u(t)$ とは独立に、すなわち、任意の $u(t)$ に対して計算されうるものになつた。

ここで、 $K(\omega)$ の性質をあきらかにするために、各段の装葉量を一定、すなわち $C_i=1$ として、かんがえよう。この時

$$\begin{aligned} |K(\omega)| &= \left| \sum_{i=0}^{N-1} \exp(-j\omega i dt) \right| \\ &= \left\{ \left( \sum_{i=0}^{N-1} \cos(\omega i dt) \right)^2 + \left( \sum_{i=0}^{N-1} \sin(\omega i dt) \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &= \left\{ \left( \frac{\cos \frac{N-1}{2} \omega dt \sin \frac{N \omega dt}{2}}{\sin \frac{\omega dt}{2}} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left( \frac{\sin \frac{N-1}{2} \omega dt \sin \frac{N \omega dt}{2}}{\sin \frac{\omega dt}{2}} \right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &= \left| \frac{\sin \frac{N \omega dt}{2}}{\sin \frac{\omega dt}{2}} \right| \\ &= \left| \frac{\sin(N\pi f dt)}{\sin(\pi f dt)} \right| \quad (6) \end{aligned}$$

となる。ただし、 $\omega=2\pi f$ である。式(6)を、 $f dt$ を変数、 $N$ をパラメーターとして表現すると図5のようになる。横軸の $f \cdot dt$ なる量は、これを利用しやすい形にすれば、その下に並記したようになる。また、式(6)は、 $f dt=1$ を周期とする函数であるから、 $f dt > 1$ の場合にはその小波部分のみとり、これを図5と照合すればよい。なお、図5においては、 $R(\omega)$ の値を $N$ に対して基準化してある。

図5の使用法は次のとおりである。いま、消去したい波の振動数を30cpsとし、 $dt=2 \times 10^{-3}$ secの段差によつてこれがどの程度小さくなるかしらべよう。この場合、 $f \cdot dt=30 \times 2 \times 10^{-3}=0.6$ であるから、これに対

応する $|K(\omega)|$ の値をよみると、 $N=2$ で0.29、 $N=3$ で0.20、……となることがわかる。

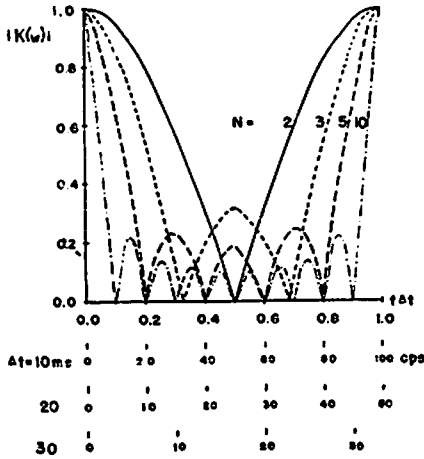


Fig. 5 Reduction ratio of ground vibration:  $|K(\omega)|$   
 N: numbers of shot  
 t: delay time between shots  
 f: frequency

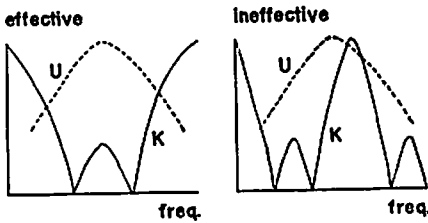


Fig. 6 Determination of  $|K(\omega)|$

さて、式(4)によれば、MSフィルター効果を大きくするためには、 $|K(\omega)|$ の小さい値をとる領域が、 $U(\omega)$ の卓越領域とよりよくかさなるようにされなければならない(図6)。ところで、 $U(\omega)$ は一般に未知であり、すでに指摘したように、変動するものである。したがって、いかなる $U(\omega)$ に対しても、 $|K(\omega)|$ の効果をつねにしめすようにするためには、 $|K(\omega)|$ の小さい値をとる領域、すなわち遮断領域の巾が十分大きくなければならない。ところで、図5によれば、

- (1)  $\Delta t$ を小にすれば、 $|K(\omega)|$ の遮断領域はその巾を大きくし、しかも、全体として周波数のたかい方にうつる。
- (2)  $N$ を大にすれば、 $|K(\omega)|$ の遮断領域はその巾を大きくする。

ということがわかるから、 $|K(\omega)|$ の遮断効果を大きくするためには、一般的にいつて、 $\Delta t \rightarrow$ 小、 $N \rightarrow$ 大に

すればよい。

各段の装薬量がことなる場合の $|K(\omega)|$ は、式(5)から算出することができる。この時の曲線の形は、その概略においては装薬量一定の場合と大差ない。なお、式(5)に対して、

$$C_i^m = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} K(\omega) \cdot \exp(j\omega \Delta t) d\omega \quad (7)$$

であるから、この式によつて、任意の $K(\omega)$ がえられるように $C_i^m$ を指定することができる。しかし、現実の問題としては、ここまでかんがえる必要はないであろう。

ここで、この理論の前提に対して、検討をくわえておこう。式(1)におけるかさねあわせが十分であるためには、すくなくとも、 $0 < t < (N-1)\Delta t$ において $u(t) \neq 0$ でなければならない。すなわち、震動の継続時間が、波形がかさなりあうように十分大きくなければならない。この点、Hartmann et al.<sup>(5)</sup>は、この値が $10^{-2}$ sec程度で小さすぎる、と否定的な意見をのべている。しかし、震源から1m前後の至近距離においてえた彼等の結果を、それが数10m以上の実際の場合に一般化することは危険である。なぜならば、震動媒体としての土地は一種の高域遮断のフィルターであり、そこを伝播する波の震動時間をひきのばすような効果をもっているからである。現に、Langefors et al.<sup>(9)(10)</sup>は、かさねあわせに有効な震動を3 cps、Morris<sup>(10)</sup>は $10 \pm 4.4$  cpsとみており、われわれの実験でも3 cpsとみられるから、1 cpsの継続時間を小さめに $3 \times 10^{-2}$  secとみつつも、震動継続時間は $10^{-1}$  sec以上となり、 $\Delta t = 10^{-2}$  secに対して十分な値といえよう、

次に、この理論においては、各段の発破点が同一位置にあると仮定している。しかし現実の発破点は段ごとに別の位置にあるから、このために

$$\frac{\text{発破点間の距離}}{\text{震動の伝播速度}}$$

の程度の誤差が時間段差にくわわる。実際には、距離は1mの程度、震動の伝播速度は $10^3$  m/sec以上とみなせるから、上の値は $10^{-3}$  sec以下、すなわち $\Delta t = 10^{-2}$  secに対して十分に無視しうる大きさとなる。

最後に、2の実験結果が、ここにあたえた理論とどの程度まであうか、ということを検討しよう。このため、瞬発発破に対する波形を $u(t)$ とし、10 msec 遅発発破に対する波形を $v(t)$ とし、これらに対する周波数スペクトル $U(\omega)$ 、 $V(\omega)$ を計算し、さらに、式(4)によつて $K(\omega)$ を算出する。ここで、周波数スペクトル $\Phi(\omega)$ の算出は、あたえられた、波形 $\phi(t)$ を震動のふりはじめから80 msecとり、これを $2\pi$ として24等分し、

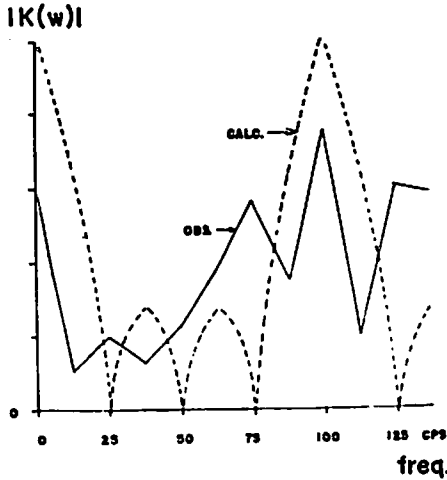


Fig. 7 Comparison between theoretical  $|K(\omega)|$  and experimental  $|K(\omega)|$

$$\phi_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2}$$

$$\left. \begin{matrix} a_m \\ b_m \end{matrix} \right\} \equiv \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{2n} \phi(i\Delta t) \begin{matrix} \sin(im\Delta t) \\ \cos(im\Delta t) \end{matrix}$$

としてもとめた（雑振動の影響を除去するためには、

$U(\omega)$ は実験1と実験2におけるその平均として、 $V(\omega)$ は実験3と実験6におけるその平均として、それぞれ算出された)。このようにして算出された  $K(\omega)$ は、図7の実線でしめされたものである。また、式(6)によつて、この場合に理論的に予想される  $|K(\omega)|$ を算出した。図7の点線でしめされるものがこれである。図7は、観測値が理論値によく近似をもっていることをしめしている。

### 5 現場における実施例

ここで、これまでのにべたMS効果が、実際に確認された例をしめすことにする。場所は、阪神上水道隧道工事現場であり、地表から約50mの点で発破作業がおこなわれていた。この地帯の岩質は良質の花崗岩であり、それゆえ、発破による地震動は減少をあまりしないままに遠方に達した。ところが、この附近一帯は住宅地であり、そのため、おおくの苦情が発生した。

これらの苦情をのぞくため、ここでMS遅発発破実験がこころみられた。すなわち、それまで現場において実施されてきたDS遅発発破による地震動が、あたらしい効果を期待してMS遅発発破による地震動と比較測定された。2つの発破は、段差がことなるほかはほぼ同一の条件においてなされた。明細は表3のとおりである。

Table 3 Blasting conditions for seismograms in Fig. 8

Record	Delay time	Charge Weight								
		1	2	3	4	5	6	7	8	total
a	msec 200	kg 3.3	1.5	1.5	2.3	2.5	1.4	2.2	2.2	16.9
b	30	4.0	1.5	2.3	2.4	2.4	1.0	1.0	2.0	16.6

また、測定器は、ピックアップにETL製のEVS-4速度型上下動地震計（固有振動数7.5cps）を使用し

Table 4 Recording conditions for seismograms in Fig. 8

Trace	Distance from shot point	Height from shot point	Site of geophone
1	10m	55m	ground
2	110	59	floor
3	80	62	ground
4	155	57	floor
5	155	57	ground

たほかは、青海実験におけると同様であつた。測定値の位置は表4のとおりである。

測定結果は図8にしめすとおりである。図8-aはDSに対する記録、図8-bはMSに対する記録である。これら記録は、MS効果がきわめて大きいことをあきらかにしている。現に、戸障子のビリビリと震動する音にしても、人体のうける衝撃感覚にしても、MSの場合の方がめだつて小さかつた。

なお、DSの記録から  $U(\omega)$ を計算してみると、これは25cpsの前後でもつとも卓越していることがわかる。したがつて、この時、 $K(\omega)$ の遮断域の中心を25cpsにおくようにすれば、すなわち、 $t=20msec$ とすれば、MS効果はさらに向上したであろうことが推定さ



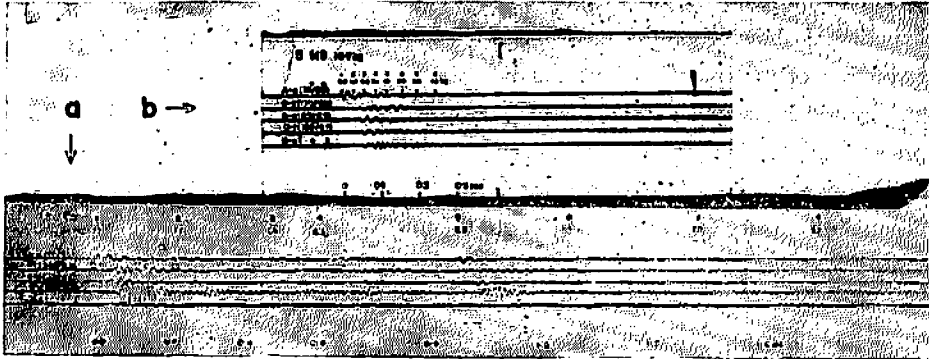


Fig. 8 Seismograms of routine blasting operations

- a) 200msec-delay blasting  
b) 30msec-delay blasting

れる。

#### 6 あとがき

本研究にあたり、実験場に関しては、電気化学工業青海工場、大鉄工業芦部谷作業所の関係者諸氏、および阪神上水道組合当局に、また、測定器に関しては、東大地球物理教室の赤松敬氏および日鉱中央試験所の萩原幸男氏に、さらに、文献に関しては、東大鉱山学教室の山口梅太郎氏および工業技術院資源技術試験所の吉田正氏に、それぞれ大きな援助をおつている、また、われわれの研究室の坂本勝一主任研究員からは、本研究の実施全般にわたり、いろいろと指導をあおいだ、ここに、感謝の意を表したい。

#### 文 献

- 1) L. D. Leet (1914) : Bull. Seismol. Soc. Amer., 39, 9-26,
- 2) J. D'Anselm (1953) : Rev. ind., 34, 510-518
- 3) L. Deflet & J. Demarouer (1954) : Explosifs., 7, 15-20
- 4) I. Hartmann, J. Nagy, H. C. Howarth, F. P. Christofel & E. C. Seiler (1952) : U. S. Bureau of Mines, Rep. Invest. 4864, 4875
- 5) I. Hartmann & B. Lewis (1954) : U. S. Bureau of Mines, Rep. Invest. 5026
- 6) L. D. Leet (1960) : Vibrations from Blasting Rock, Harvard Univ. Press.
- 7) G. Morris (1950) : Engineer, 190, 430-433
- 8) B. G. Fish (1951) : Mine & Quarry Engineering, 17, 111-7, 145-148, 189-192, 217-222
- 9) C. H. Johansson & U. Langefors (1951) : Mine & Quarry Engineering, 17, 287-293
- 10) U. Langefors, B. Kihlström & H. Westerby (1958) : Water Power, 335-, 390-, 421-
- 11) F. J. Crandell (1949) : J. Boston Soc. Civ. Eng., 36, 222-245
- 12) R. Köhler (1955) : Nobel Hefte, 21, 127-131
- 13) C. A. Swartz & V. M. Sokoloff (1954) : Geophysics, 13, 402-419
- 14) H. I. Jones, J. A. Morrison, G. P. Sarrafian & L. J. Spieker (1955) : Geophysics, 20, 745-765
- 15) C. H. Savit, J. T. Brustad & J. Sider (1958) : Geophysics, 23, 1-25
- 16) G. Morris (1950) : Engineer, 191, 394-395, 414-418

## Ground Vibrations from Millisecond Delay Blasting

by K. Nawa and H. Honda

The investigation deals with a theoretical and experimental treatment concerned with

the reduction of ground vibrations in the case of millisecond delay blasting.

The result of the analysis of seismograms in the experiment shows that the mechanism of the reduction of ground vibrations can be interpreted by the interference theory (Fish, Langefors et al., etc.) and not by the division theory (Hartmann et al., Leet (1960), etc), or the decoupling theory (D'Anselm, Deffet et al., Leet (1949), etc.).

The interference theory can be transformed in the frequency domain. In this case, the reduction ratio of ground vibrations, which are assumed to take sine-wave form, is:

$$K(\omega) = \sum_{i=0}^{N-1} C_i^m \exp(-j\omega i \Delta t)$$

where  $C_i$  is the charge weight of the  $i$ -th shot,  $\Delta t$  is the delay time between shots,  $\omega$  is the angular frequency, and  $m$  is a constant. The reduction ratio increases with the decrease of  $\Delta t$  or the increase of  $N$ .

The theoretical  $K(\omega)$  agrees with the  $K(\omega)$  calculated from experimental seismograms. In routine operations, this theory is also effective.

## 無煙火薬の帯電に関する研究 第2報

### 帯電した火薬の自然放電に就いて

植竹 万太郎・佐藤 寛\*

#### 目 次

1. 緒 言
2. 帯電並びに放電の理論式
3. 帯電導体が高抵抗を通して放電する場合
4. 帯電不導体が放電する場合
5. 結 び

#### 1. 緒 言

前報<sup>1)</sup>において報告したように飽和帯電量は発生する電気量と放電する電気量が平衡に達した時に起る。帯電体は電気抵抗 ( $R$ ) を通して放電する。無煙火薬が不導体であつても電気抵抗が無敵大でない限り放電現象はあるはずである。この報に於いては帯電体の自然放電に関する二、三の実験を行つたので報告する。

#### 2. 帯電並びに放電の理論式

火薬が器具又は装置と接触摩擦して帯電すれば、火薬と接触する物体にも必ず異符号、等量の電荷が発生する。今この電荷が放電する場合を考えると大地と器具又は装置との間の静電容量を ( $C$ )、抵抗を ( $R$ ) とすればその回路は Fig. 1 のようになりその放電の理論式は一般に良く知られている<sup>2)</sup> ように

$$V = A e^{-\frac{t}{CR}} \quad \text{①}$$

電流で表示すれば

$$I = V/R = A/R \cdot e^{-\frac{t}{CR}}$$

で表わされる。 $A$  は①式から明らかなように  $t=0$  即ち放電開始時の電圧である。

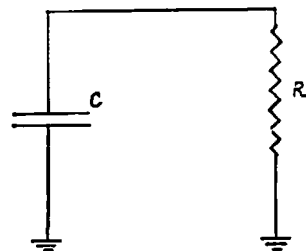


Fig Discharge circuit

又一方火薬の帯電に就いて考えるなら前報で報告したように薬量と帯電量は一定の操作であれば比例する。このことは火薬を一定操作で取扱えば発生電気量は一定の速度になることを示すものである。つまり発生電気量は

昭和36年11月28日受理  
旭化成工業株式会社市工場 大分県北海部郡昭和ノ市町