

MS 遅延発破による地震動 (II)

名 和 小太郎 · 譽 田 博*

0. ま え が き

前論文¹⁾において、われわれは、MS 遅延発破による地震動の消去 (以下 MS 効果と略称) について、これが波の干渉によるものであることを実験的にしめし、これが地震探鉱におけるフィルター理論²⁾により解釈できることを主張した。この論文では、このフィルター理論が、おなじく干渉説にたつ他の諸理論とどのようにことなるかについて説明し、さらに、現場における実施例の結果について、フィルター理論よりする検討をあたえることにする。

1. フィルター理論の概要

MS 遅延発破において、一連の発破から発生する弾性波の合成波形を $v(t)$ 、各段の波形を (単位装薬量の場合) $u(t)$ とすれば、

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

なる関係がある。ここで、 N は段数、 Δt は段差、 C_i は i 段目の装薬量、 m は定数である。式(1)を振動数領域に変換すると、 $V(\omega)$ 、 $U(\omega)$ をそれぞれ $v(t)$ 、 $u(t)$ の振動数スペクトルとして、

$$V(\omega) = K(\omega) \cdot U(\omega) \quad (2)$$

$$K(\omega) = \sum_{i=0}^{N-1} C_i^m \exp(j\omega i\Delta t) \quad (3)$$

なる関係がえられる。ここで、各段の装薬量が一定の場合についてみると、式(3)は

$$|K(\omega)| = \left| \frac{\sin(N\pi f\Delta t)}{N \sin(\pi f\Delta t)} \right| \quad (4)$$

となる。ただし $\omega = 2\pi f$ である。ここで O'Brien³⁾にしたがい、 $m=1$ として、装薬量に対する基準化をおこなった。式(4)を図示したものが図 1 である。

式(3)、(4)および図 1 は、MS 効果が発生地震動に対するフィルター効果にほかならないことをしめす。このフィルター効果を大きくするためには、 $K(\omega)$ の遮断領域が $U(\omega)$ の卓越領域とよくかさなることが必要である。それゆえ、このためには、 f^* で $U(\omega)$ が最大値をしめすとした時に、

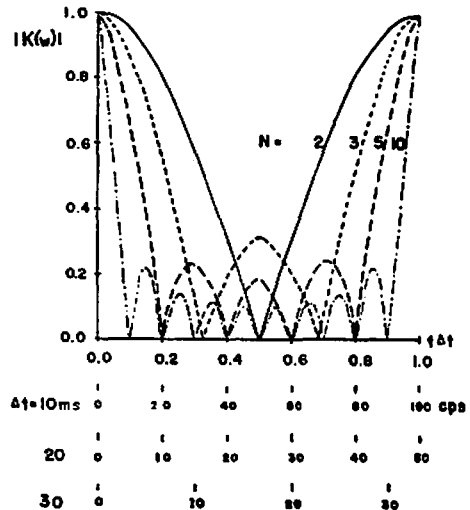


Fig. 1 Reduction ratio of ground vibration

N : numbers of shot

Δt : delay time between shots

f : frequency of ground vibration

$$f^* \Delta t = \frac{2n+1}{2}, \quad n = 0, 1, 2 \quad (5)$$

にとることがぞましい。

なお $K(\omega)$ の 1 周期、すなわち $\Delta t = 1/f$ は、その中に遮断領域と通過領域とを 1 帯域づつふくむから、 f が大になると、 Δt のわずかな変動によつて、ふたつの領域が相互にうつりかわる可能性を生ずる。それゆえ、この場合には、 Δt の決定は正確になされなければならない。しかし、これは、起爆に電気雷管を使用するかぎり、その製造技術の点から不可能である。したがつて、このような要求のあるときには、むしろ、電気的な遅延回路によるか、導線線利用の遅延管 (du Pont の Elcord, Hercules の EP-172 など) によるかした方がよい。

2. 他理論との比較

干渉説の立場によつて MS 効果を論じたものに、Langefors et al⁴⁾、および Morris⁵⁾ の理論がある。

Langefors et al,によれば、MS 効果は、

$$\Delta t = \frac{n'}{N} \cdot \frac{1}{f} \quad (6)$$

なる条件で卓越するが、とくに、

昭和38年1月23日受理

* 旭化成工業 (株) 技術研究所, 東京都板橋区志村中台町

$$\frac{n'}{N} = \frac{2n+1}{2} \quad (7)$$

なる条件をみたすときに最大となる。ここで、 N 、 n 、 n' は整数、 n'/N は非整数である。式(6)、(7) は式(5) と同等である。すなわち、この結論はフィルター理論のそれに一致する。

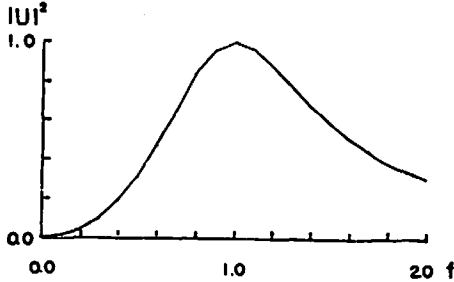


Fig. 2 Frequency spectrum for Morris' wavelet

Morris によれば、MS 効果を最大にする条件は、

$$u(t) = \exp(-2\pi k f_0 \Delta t) \cdot \cos(2\pi f_0 \Delta t) \quad (8)$$

と仮定したとき、 $k = 0.07$ として

$$\Delta t = \frac{1}{5f_0} \sim \frac{1}{2f_0}$$

である。ここで、Morris の条件に対してフィルター理論を適用してみよう。式(8) に対する振動数スペクトルを計算すれば、

$$U(f) = \left[\frac{k^2 f_0^2 + f^2}{(k^2 + 1)^2 f_0^4 + (k^2 - 1) f_0^2 f^2 + f^4} \right]^{1/2} \quad (9)$$

がえられる。式(9) を $k = 0.07$ としてパワー・スペクトル $|U(\omega)|^2$ の形で表示したものが図2 である。 $(k < 0.1$ ならば曲線形は略同一である。) 図2 によれば、

$$f^* = f_0 \quad (10)$$

であるから、MS 効果を最大にする条件として、

$$\Delta t = \frac{2n+1}{2f_0}, \quad n = 0, 1, 2, \quad (11)$$

がえられる。この結論は Morris 自身がなした計算結果よりやや大きい値をししている。これは、フィルター理論が震動波の卓越成分に着目しているのに対して、Morris が全合成振巾に注目しているからである。この点、フィルター理論の方が、その物理的な意味においては、Morris 理論よりおとつている。しかし、

フィルター理論における $u(t)$ に何等の制限もないのに反し、Morris 理論におけるそれは式(8) であたえられるものとして、しかも式中の定数も特定値をもつものとして、制限されている。この点については、フィルター理論がよりひろい一般性をもつものといえよう。

3. 現場における実施例

ここで、MS 効果の現場における例をしめす。ただし、数多の実施例のうち MS 効果が確認された例と、確認されなかつた例を紹介しよう。これは、MS 効果の適用性とその限界とを検討するためである。

(1) 成功例

まず、MS 効果の確認された例、すなわち、成功例をしめす。この例は、その概要を前報告にもしめたが、ここであらためて詳細に引用することにする。これは、60年11月に、兵庫県の阪神上水道作業現場においてなされた実験によつて、えられたものである。

実験目的は、第一に発破地震動の大きさを測定することであり、第二に発破地震動を減少せしめるような発破方式を設計することであつた。これがなされた理由は、この地区が住宅地であるため、特に発破地震動をおさえることが要請されたからである。

(i) 現場の状況

作業現場およびその周辺は図3 にしめされる。実験にあつては、物理的または心理的な震害があるともうしたてられた位置に測定点がもうけられた。その点を図3 にしめす。隧道は地表下 50~60m にあつた。隧道の断面積は 9.7m² であつた。隧道周囲から地表にいたるまで、岩質は良質な花崗岩であつた。

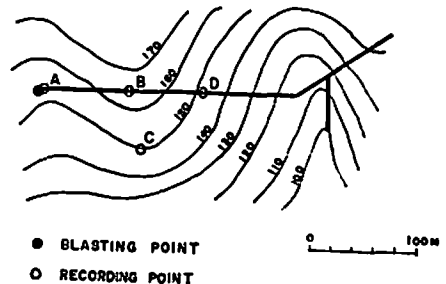


Fig. 3 Blasting at a tunnel under a residential quarter.

(ii) 測定方式

測定器としては、ピック・アップに ETL 製の EVS-4 型受震器を利用した。これはその出力が震動の粒子速度の上下動成分であり、その固有振動数が 7.5c/s である動線輪型の換振器である。記録器には

三栄測器製の 100-B 型電磁オッシロを使用した。これは固有振動数 800c/s のガルバを内蔵したものである。ピック・アップは記録器に直結された。

ピック・アップは、地上 (g) または建物内の床 (f) に設置された。

(iii) 発破方式

発破方式としては、電気雷管による DS 遅延発破

および MS 遅延発破がとられた。いずれの場合も薬孔長は 1.6m であり、爆薬には旭化成製の膠質ダイナマイト (爆速: 6,500m/s, 比エネルギー: 9,500l-kg/cm², 比重: 1.5) を使用した。発破条件は表 1 にしめすとおりである。雷管の延時秒時は表 2 のとおりである。

Table 1 : Blasting conditions (Exp. 1)

Trial	Delay	Number of hole	Charge weight								
			No. 1	2	3	4	5	6	7	8	Total
1	DS	18	4.4kg	2.7	2.4	2.4	0.9	0.0	2.0	2.0	16.8
2	DS	19	3.3	1.5	1.5	2.3	2.5	1.4	2.2	2.2	16.9
5	MS	19	4.0	1.5	2.3	2.4	2.4	1.0	1.0	2.0	16.6

Table 2 : Delay intervals

	No. 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DS	0.0s	0.2	0.4	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4
MS	0.00	0.03	0.06	0.09	0.12	0.16	0.20	0.25	0.30	0.35

(iv) 解析結果

記録例は、前論文図 8 にしめしたとおりである。解析は記録波形の最大振巾に注目してなされた。DS 遅延発破の場合には各段の地震動が分離して記録されたので、ここでは、それらのうちもつとも卓越した第 1 段のものに着目することにした。記録からよみとられた最大振巾の値は表 3 にしめすとおりである。

Table 3 : Maximum amplitudes (Exp. 1)

Trial	Recording points							
	A-g	B-g	C-f	D-g	D-f	E-g	E-f	
1				0.13	0.47	0.34	0.23	0.29
2	kine			0.23	0.21	0.16	0.10	0.44
5	0.16	0.13	0.08	0.10	0.08			

g : on the ground
f : on the floor

ここで、DS 遅延発破における振巾と MS 遅延発破におけるそれらの比較をおこなってみよう。これをその振巾比についてしめしたものが表 4 である。これによれば、測定点が地上にある場合にはその値は略一定であり、平均が 1.37 標準偏差が 0.19 であると計算される。さて、表 5 の比が 1 以下になる確率を計算してみよう。このために、Chebyshev の不等式を利用す

Table 4 : Ratio of maximum amplitude (Exp. 1)

	A-g	B-g	C-f	D-g	D-f
Amp. at DS/ Amp. at MS	1.5	1.6	2.0	1.0 1.3	5.7 5.7

ることとする。一般に任意の分布をもつ確率変数 X の平均値を α とし、その標準偏差を σ とすると、任意の 1 より大きい正数 ξ に対して、

$$P\{|X-\alpha| < \xi\sigma\} \geq 1 - \frac{1}{\xi^2} \quad (12)$$

が成立する。したがって

$$\begin{aligned} P\{(X-\alpha) \geq \xi\sigma\} &= P\{(\alpha-X) \geq \xi\sigma\} \\ &= \frac{1}{2} \left[1 - P\{|X-\alpha| < \xi\sigma\} \right] \leq \frac{1}{2\xi^2} \quad (13) \end{aligned}$$

となる。われわれの場合、 $\alpha=1.37$, $\sigma=0.19$ であるから、 $X \leq 1.0$ なる場合には、 $P \leq 0.13$ であることがわかる。すなわち、MS 効果がみとめられない場合は、13% 以下であると推定できる。なお、表 5 においては、測定点が床上にあるときは、その値が大きくばらついている。これは、床の土地に対する結合状態がさまざまであるため、その震動を複雑にするためと推測される。しかしこの場合には、MS 効果はさらに大

きいことがわかる。なお、これらの実験において、発破の総装薬量は略同一であったが、正確にいえば、DS 遅延発破の振巾は、初段の心ぬき（総装薬量の約1/5）に対するものであり、この点からいえば、MS 効果がさらによいことがわかる。現実には、人体のうける感覚にしても、また家なりにしても、MS 遅延発破における場合に、格段にちいさかった。

(2) 失敗例

ここで、MS 効果の確認されなかつた例、すなわち、失敗例をしめす。これは、62年6月に、室蘭本線の辺加牛隧道複線化工事現場においてなされた実験により、えられたものである。実験目的は前例と同一であるが、これが実施された理由は、建設中の隧道における発破震動が既設隧道に破壊的な影響をもつことをおそれたからである。

(1) 現場の状況

測定にあたっては、ピック・アップを、建設中の隧道における切羽面から最短距離になるような既設隧道中に設置した。測定の時点において、このふかさは長万部口より425mの距離にあつた。この点における新設線と現在線との位置関係は、図4にしめすように、中心線間の水平距離で40.0m、床面の水準差で7.2mである。新設線は、測定時には、上半断面(12.3m²)のみ掘削中であつた。現在線は、あつみ30cmのコンクリート覆工をほどこされている。発破点および測定点をふくむ範囲の岩質は角礫凝灰岩であつた。

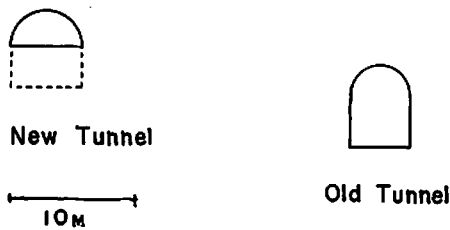


Fig. 4 Blasting at a tunnel close to another tunnel.

(ii) 測定方式

ピック・アップには、保坂振動計器製の MTDH-1C 型地震計2台と、MDTV-1C 型地震計1台とを使用した。いずれも動線輪型の換振器であり、その固有振動数は1c/sである。その出力は地動の粒子速度に感応するが、MTDH 型はその水平動成分を、MTDV 型はその上下動成分を記録する。ピック・アップの出力は減衰器をとおして記録器にみちびかれる。記録器には、前例の場合との同一のものが使用された。

(iii) 発破方式

発破方式としては、電気雷管によるDS 遅延発破およびMS 遅延発破がとられた。いずれの場合も穿孔長は2.0mであり、爆薬には旭化成製の膠質ダイナマイト(爆速:6,000m/s, 比エネルギー:9,000J/kg/cm² 比重:1.5)を使用した。装薬量およびその配分については表5に引用する。雷管の延時秒時は前例と同一である。

(iv) 解析結果

記録例は文献8図3にしめしてある。解析は、ここでも震動の最大振巾に注目しておこなうことにする。記録としては、上下動、前後動、左右動の3成分がえられたが、いずれも略同一なので、以下、解析は上下動についておこなう。それぞれの場合における最大振巾は、表6のとおりである。なお、DS 遅延発破の記録は1枚しかないのであるが、その4~8段に分配された装薬量が同一であり、しかも最大であるので、これに対する震動をそれぞれ独立になされた発破によりえられたものとかがえる。この記録上では、各段の震

Tabel 6: Maximum amplitudes (Exp. 2)

Trial	Maximum amplitudes
1	0.76kine
2	0.71
3	0.47 0.33 0.47 0.38 0.47
4	0.57

Table 5: Blasting conditions (Exp. 2)

Trial	Delay	Number of hole	Charge weight										Total
			No. 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	MS	93	0.35kg	1.60	3.10	3.85	3.60	5.35	5.85	7.35	4.35	3.85	47.55
2	MS	78	1.10	1.10	2.35	3.80	4.35	5.10	5.60	5.10	4.35	4.35	44.05
3	DS	83	0.85	0.85	3.60	5.35	5.10	5.35	5.35	5.35	4.60	2.85	46.55
4	MS	90	0.85	0.85	2.60	4.35	4.10	4.60	4.60	4.35	3.60	3.10	41.00

動波形がたがいに分離してあらわれているので、このような処理は可能である。

いま、MS 遅延発破による振巾を X_1 、DS 遅延発破によるそれを X_2 とし、 X_1 、 X_2 の平均値および標準偏差をそれぞれ α_i 、 σ_i ($i=1,2$) とすれば、表 7 から、 $\alpha_1=0.42$; $\sigma_1=0.07$ および $\alpha_2=0.68$; $\sigma_2=0.09$ と算出することができる。ここで、 $X_1 > X_2$ となる確率をもとめてみよう。このためには、

$$P^*(X) = \int P_1(X_1=X) \cdot P_2(X_2 < X) dX \quad (14)$$

を計算すればよい。ただし

$$\left. \begin{aligned} P_1(X) &= \frac{d}{dX} P\{(X-\alpha_1) \geq \xi' \sigma_1\} \\ P_2(X) &= P\{(\alpha_2-X) \geq \xi'' \sigma_2\} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

であり、これらの値は Chebyshev の不等式からもとめられる。式 (15) を代入することによって式 (14) を計算すると、 $P^*(X)=0.06$ をうることができる。なお、積分は区間 $(\alpha_1+\sigma_1, \alpha_2-\sigma_2)$ にて実施したが、このことによる誤差は 10^{-2} 程度とみられる。以上から、MS 効果がみとめられる場合は 10% 以下であることがわかる。すなわち、ここでは MS 効果はネガティブであったという。

【付記】

ここで、例示したふたつの場合について、震害の可能性を検討してみよう。これまでの報告⁹⁾によれば、家屋に損傷を生ずるのは 1~10kine 以上であり、陸道に損傷が生ずるのは 20kine 以上であるとされている。したがって、いずれの場合においても、震害に対しては安全であったといえる。

(3) 実施例の比較検討

以上の 2 例のうち、MS 効果は、第 1 例においてみとめられ、第 2 例においてみとめられなかつた。この理由を、フィルター理論によつて検討してみよう。

MS 効果は近似的に式 (4) によつてあたえられる。いま、これに、記録から決定された f と、実験条件からえられる N と Δt とをあたえると、表 7 にしめすように、 $K(\omega)$ をうるることができる。この結果

Table. 7 $K(\omega)$ for Exp. 1 and Exp. 2

	Exp. 1	Exp. 2
f	50 c/s	100
Δt	3×10^{-3} s	3×10^{-3}
N	8	10
$K(\omega)$	0.0	1.0

によれば、第 1 例においては震動が消去しあい、第 2 例においてはそれが強調しあうことがわかる。これは実験結果によく照応するものといえる。なお、第 1 例の震動が理論の予測するような 0 の値をとらないのは、この震動が 50 c/s 以外の振動数成分をふくんでいるためである。

次に、これらの場合において、 $K(\omega)=0$ にするためにはどのような Δt えらんだらよいかをしめそう。このような Δt は、式 (5) からもとめられる。この値は、第 1 例では $\Delta t=10$ ms, 30, 50……となり、第 2 例では、 $\Delta t=5$ ms, 15, 25……となる。この点からも、第 1 例の Δt が適値であり、第 2 例の Δt が不適値であつたことがわかる。ただし、発破震動は無限にくりかえす周期的な波形をもっていないから、第 1 例においても、 Δt を 10ms とした方が、それを 30ms とした場合より、より大きな MS 効果をもつたであろうことが予想される。すなわち、以上の成巧例と失敗例とは、フィルター理論の適応性をポジティブな面とネガティブな面とから、それぞれ実証するものといえる。

謝 辞

この実験をおこなうにあたり、国鉄札幌工事局、阪神上水道企業庁、大鉄工業(株)および西松建設(株)の関係者諸氏から援助をうけた。また、この実験は、われわれの研究室の坂本勝一課長の指導によつてなされた。ここに、あわせて感謝の意を表したい。

文 献

- 1) 名和小太郎、菅田博：工業火災，23，61~70，(1962)
- 2) C. A. Swartz and V. M. Sokoloff：Geophysics，19，402~419，(1954)
- 3) H. I. Jones, J. A. Morrison, G. P. Sarrafian and L. J. Spieker：Geophysics，20，745~765，(1955)
- 4) C. H. Savit, J. T. Brustad and J. Sider：Geophysics，23，1~25，(1958)
- 5) P. N. S. O'Brien：J. Roy. Astron. Soc.，3，29~44，(1960)
- 6) U. Langefors, B. Kihlström and H. Westerberg：Water Power，10，335~338，390~395，421~424，(1958)
- 7) G. Morris：Engineer，190，430~433，(1950)
- 8) K. Nawa：Proc. Japan National Symposium on Earthquake Engineering，33~37，(1962)
- 9) 名和小太郎：工業火災，22，272~275，(1961)

Ground Vibrations from Millisecond Delay Blasting (Part 2)

by K. Nawa and H. Honda

The previous paper shows that interference of wavelets at millisecond delay blasting brings about a remarkable effects in reducing ground vibrations. This phenomenon is formulated as follows.

Now, consider millisecond-delay blasting in which the total charge is equally divided into N units and each unit is detonated successively at a equal delay interval of Δt . Then, by referring the theory of delay line filter in seismic prospecting, the relation of wave form for a single shot with that for millisecond-delay blasting is given by

$$V(f) = \frac{\sin(N\pi f\Delta t)}{\sin(\pi f\Delta t)} \cdot U(f)$$

where $U(f)$ and $V(f)$ are a frequency spectrum for a single wavelet and that for millisecond-delayed wavelets, respectively. Accordingly, the rate of attenuation of sine wave with a frequency of f is given by

$$K(f) = \frac{\sin(N\pi f\Delta t)}{N\sin(\pi f\Delta t)}$$

which is illustrated in fig. 1.

This theory coincides with Langefors' theory and Morris' theory, and is confirmed by routine operations.

(Technical Laboratory, Asahi Chemical Industry Co., Ltd.)

ニュース

高性能小型マイクロフラッシュ

菅原研究所では、このほど最低0.7マイクロ秒という短時間の閃光時間で、高速運動体、破壊現象、液体の噴射状況等を写真撮影できる小型携帯式のマイクロフラッシュを完成した。これはスイッチ切替えにより、0.7, 1.8, 3, マイクロ秒の閃光時間を得ることができるので応用分野が広い。構成は特殊クセノン放電管などを内蔵するランプハウスと電源部、増幅部、トリガー増幅部および操作を行なうための操作部を持つ本体とからできている。製品名は「マイクロフラッシュ MHF-1型」で価格は一式20万円である。(日刊工業 38-4-16)

岩盤破砕機の開発

函館ドックは、かねて強力な破砕力をもつ岩盤破砕機の開発をすすめていたが、このほど試作に成功した。これは大発破後の岩塊の小割り用として設計されたもので、今後発破に代って岩盤破砕を一手に引受けるものと予想される。

試作機の大きさは、全長 4.75m, 巾 1.97m, 高

さ 2.2m で重量は約 5t である。頭部に破砕機の本体を備え、本体を支持するアーム、フレームは旋回、交流、横転する装置をもっている。本体は刃先部を上下に自在に動かすマジックハンドのような機構を備えている。(日刊工業 38-3-7)

大型鏡板の水中爆発成型実用化

日本製鋼所室蘭は昨年4月から水中爆発成型法によつて、16~19mm板厚の特殊鋼板(2H鋼板)を使った鏡板(直径1.5~2.5m)の試作研究をすすめていたが、このほど実用化の段階に入った。この鏡板は高圧のかかるドラムタイプ貯蔵タンクのエンドプレートを目的に開発したもので、内圧10kg/cm²程度のものまでに利用可能。爆発成型法によると、その製品は、スプリングバックが少ない。加工硬化しない。溶接性も変りがない等の特徴がある。また加工設備費が安く、成型精度が良い等の利点もある。同所では現在「大型鏡板の衝撃的成型法」として特許を出願しているほか、通産省に対して飲工業技術研究補助金の申請を考慮中。

(日刊工業 38-4-2)