

(52) ゆるめ発破における発破振動の推定

山口大学工学部	正会員	中川 浩二
同	正会員	○三浦 房紀
同	正会員	国松 直
同	学生会員	中満 光広
宇部興産(株)	正会員	原田 晋作

1. まえがき

最近、発破振動に対する関心が非常に高まっているが、これには次の2つの問題点がある。第1は近接する既存の構造物の耐震性、耐衝撃性に関する問題であり、第2はいわゆる振動公害としての問題である。狭い国土に多くの人口を有し高密度のライフラインシステムが張り巡らされている我国の現状からして、この種の問題は今後増加の一途をたどるものと考えられ、従って発破振動の推定の重要性も益々増大するものと考えられる。従来から用いられている発破振動の推定式は最大速度振幅をその対象とするものであり、前者の問題に対してはこれは妥当性を有するものと考えられている。しかし、後者の問題には周波数特性、継続時間にも強く影響を受ける人体感覚が深くかかわっていることから、最大速度振幅だけでは不十分とされてきた。この様な背景の下で昭和51年に振動に関する公害規制法が制定され、それと同時に振動レベルによる評価法が明記されて公害振動の評価法は確立された。従って、今後は発破振動においても最大速度振幅のみならず振動レベルによる発破振動の推定が必要不可欠になるものと思われる。

また一方では、振動規制値などの制限から大量の薬量で発破を打てる機会は少なくなり、ゆるめ発破を採用せざるを得ない場合が今後益々増加するものと考えられる。このゆるめ発破を行なうに際しては、段発の発破間隔が振幅あるいは振動レベルに影響を与えることが予想される。そこで、本研究ではゆるめ発破を対象として、発破の時間間隔と振動レベルとの関係を明らかにするために、実験および計算機によるシミュレーションの両面から考察を試みた。

2. 振動レベルの算定法¹⁾

JIS (C-1510)によると、振動レベル VL (dB) は次式で定義される。

$$VL = 20 \log_{10} \frac{a}{a_0} \quad (1)$$

ここに、 a_0 は基準加速度であり、 $a_0 = 10^{-5} \text{ m/s}^2$ である。また、

a は振動感覚補正を行った加速度実効値であり、次式で与えられる。

$$a = \sqrt{\sum_n a_n^2} \quad (2)$$

ここに、 C_n は周波数 f_n (Hz) における相対レスポンスであり、周波数 f と図-1に示す関係がある。また a_n は周波数 f_n の加速度実効値であり、次式で定義される。

$$a_n = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_{fn}(t)^2 dt} \quad (3)$$

発破振動の観測波形には多くの周波数成分が含まれているので、レベルの算定に際してはまず加速度記録をFFTによりフーリエ変換し、各周波数毎に式(3)あるいは $a_n = A_n/\sqrt{2}$ なる関係を用いて実効値を求める必要がある。ここに A_n は周波数 f_n の調和波の振幅である。

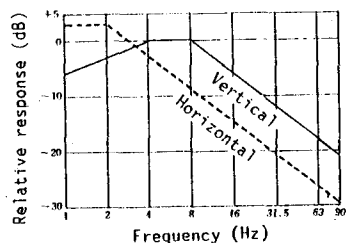


図-1 周波数に対する相対レスポンス

3. 発破実験と解析

(1) 実験の概要

発破振動の基本波形を得るために半発発破およびゆるめ発破を想定した段発発破を行ないそのときの振動波形を計測した。場所は宇部興産伊佐石灰石鉱山内の平坦な地を選んだ。これは波形に及ぼす地形の不規則性の影響を避けるためである。発破規格を表-1に、使用雷管を表-2に、また発破地点および観測点の平面図を図-2に示す。図中、黒丸が発破孔を表わし、その下の記号は雷管名を、括弧内に示した数字は標準秒時(規格値、ms)を表わす。円内の数字は発破番号を表わす。すなわち、①、④、⑦が段発発破、②、③、⑤、⑥、⑧、⑨が半発発破である。ここで段発発破は前後の発破の影響が発破振動に及ぶもの、半発発破は及ばないものとして区別している。また、○印は観測点を表わし、[VEL]は速度、[ACC]は加速度ピックアップを表わす。波形はデータレコーダに記録し、AD変換した後これを山口大学情報処理センターACOS-800 SYSTEMにファイル化して後の解析に用いた。使用した計測機器類を表-3にまとめて示す。

(2) 観測結果と考察

(a) 半発発破による加速度波形の特性と振動レベル

本研究は発破間隔をいろいろ変えて合理的に振動レベルを低く押えるための最適の時間差を決定することをその目的の1つとしている。これを実験的に決定することは極めて多くの場合について発破を行なわなければならない事実上不可能である。そこで、ここでは基本となる波形を重ね合わせることによって計算機によりシミュレーション波形を作成し、これに対して検討を加えることにする。その際に1つの波形を重ね合わせることに合理性をもたせるためには、段発の各々の発破による波形が同じであること、すなわち、観測点を固定した場合にほぼ同じ方向、同じ距離から伝播してくる波に再現性があることを必要とする。図-3はこの様な観点から発破番号②、⑤、⑧の100m地点における加速度波形を比較したものであるが、振幅、周波数特性共にかなりの再現性が認められる。これより、重ね合わせによる波形のシミュレーションは妥当性を持つものと予想

表-1 発破規格

孔径	孔長	1孔当りの装薬量
60mm	2.0m	1.0Kg (あかつき $1\frac{1}{3}$ 本)

表-2 使用雷管 (脚線長4.5 m)

MSD	段	1	2	3	4	5	7	10
	本数	3	1	2	2	1	2	1
DSD	段	5	7					
	本数	3	3					

表-3 使用計測機器

速度ピックアップ	GEO SPACE CORP. DIGIPHONE
加速度ピックアップ	明石製作所、サーボ加速度計、V401
増幅器	三菱測器KK、6L5、
データレコーダ	TEAC、R-61
AD変換器	岩通、DIGITAL MEMORY DM-305

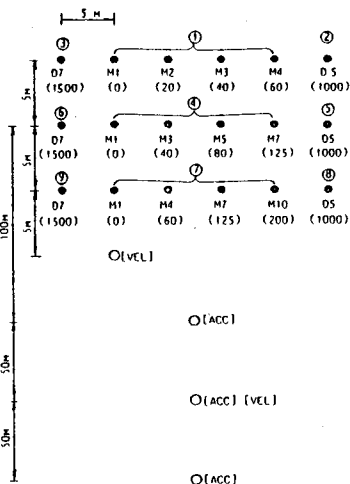


図-2 発破地点および観測点の平面図

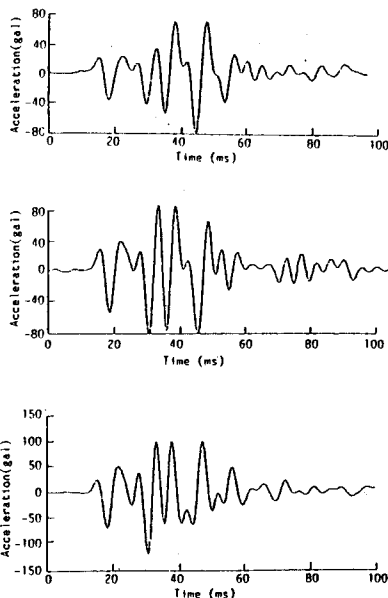


図-3 同一地点で観測された加速度波形の比較

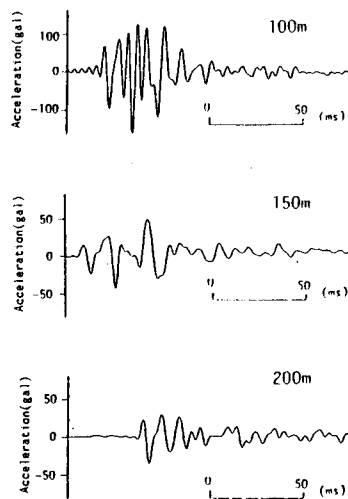


図-4 半発発破における加速度波形と距離減衰

される。

図-4は発破番号⑧の100、150、200 m地点における各加速度波形を示したものである。距離の増加とともに振幅、高周波数成分が減少するとともに主要動部分が長くなっている。図-5は発破番号⑧、⑨に対して各観測点における波形の振動レベルVLをFast (T=200 ms) で算定した結果を示したものである。また、同図には最大加速度値MAも示してある。この図より以下のことがわかる。まずVLによる評価の方が同一地点の観測結果にばらつきが小さい。次にこれもVLの方が距離減衰が小さい。今、距離減衰を距離Dの指数関数形すなわち、 $D^{-\alpha}$ で表わすとVLに対して α は約0.48、MAに対しては約3.25となり、両者の間に6倍以上の差がある。レベルによる距離減衰が小さいのは、距離が大きくなると振幅は低下する反面、継続時間は長くなり、結果としてパワーの低下は振幅ほど著しくないためと考えられる。ちなみに、最大速度振幅の推定にはこの値として2前後の値が用いられるが、振動レベルに対して距離減衰を評価する場合には直接速度振幅の推定式の距離減衰に対する考え方は適用できないことをこの結果は示唆しているといえよう。

(b) 段発発破による加速度波形

図-6は段発発破⑦の各観測点における加速度記録であり、上から順に100、150、200 m地点におけるものである。100 m地点の波形は各段の波形の識別が容易であるが、距離が増すに従ってその識別が困難になり、200 m地点ではほぼ同じ程度の振幅が継続している。

図-7は図-4に示した波形を段発発破と同じ発破間隔でずらして重ね合わせて作成したシミュレーション波形である。これと図-6とを比較すると、150 m地点でシミュレーション波形の振幅がやや小さいことを除いては、振幅、位相特性いずれも良い一致が見られる。

4. 段発発破における振動レベル

図-6および図-7に示した各観測点における波形についてそれぞれ振動レベルを算出した。振動レベルを算出するために用いた時間間隔は256 msであるが、算定に用いる波の位置により振動レベルの変わることが予想される。そこで算定に用いる波の最初の位置を5 msずつずらしてその影響を調べたのが図-8、9であり、図-8が観測波形、図-9がシミュレーション波形に対するものである。この図によれば波の最初の時間を移動させても振動レベルはほとんど変化しないことがわかる。

次に図-8、図-9で求められた振動レベルの平均値を用いて各観測波形に対する振動レベルとシミュレーション波形に対する振動レベルの比較および観測点の距離による影響を調べたのが図-10である。この図より発破源から遠ざかるにつれて両者の差は小さくなり、200 mではほとんど一致することがわかる。先と同様の方法で距離減衰を指数表示すれば観測波形に対して $\alpha=0.53$ 、シミュレーション波形に

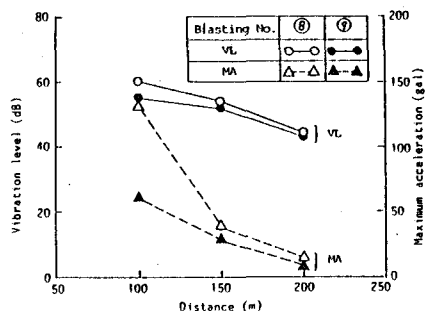


図-5 振動レベルと最大加速度値との距離減衰の比較

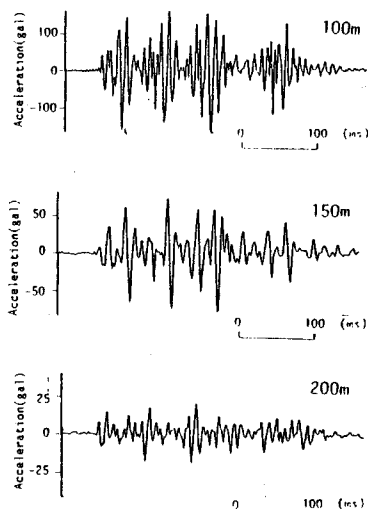


図-6 段発発破振動の加速度波形とその距離変化

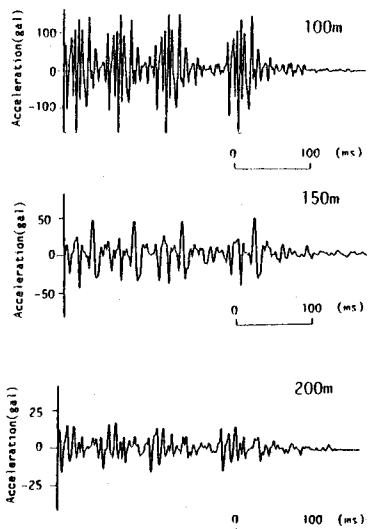


図-7 段発発破振動のシミュレーション波形

対して $\alpha=0.47$ となり半発波形により得られた $\alpha=0.48$ の値とほぼ同じである。

発破源に近い 100、150 m の振動レベルについて考察するために、観測波形、シミュレーション波形のそれぞれについて各観測点に対して求めたフーリエスペクトルが図-11で

ある。ここで、実線は観測波形に対するものであり、破線はシミュレーション波形に対するものである。図-1 から明らかのように振動レベルに影響を与える周波数はかなり低いわけであるが、図-11の低周波領域に着目すれば 100 m 地点の振幅は観測波形のものが明らかに大きくなっており、200 m 地点の振幅には両者の間にほとんど差異はみられない。図-10における両者の差はこのような点に起因しているものと考えられる。

図-10に見られるようにシミュレーション波形により算出した振動レベルは観測波形により算出したそれとほぼ一致することが判明した。そこで、半発発破により得られた観測波形を用いて段発発破における発破間隔が全て等しいシミュレーション波形を作成し、ゆるめ発破における発破間隔の振動レベルに及ぼす影響を調べてみた。図-12にその結果を示す。

図-12は横軸に発破間隔を、縦軸に振動レベルをとり観測点の距離をパラメータとしてプロットしたものである。この図から、発破間隔が長くなれば、観測点の距離にかかわらず振動レベルが低下することがわかる。

以上、観測波形、シミュレーション波形の解析から興味ある結果が得られたが、解析に用いられた波形の数は極少数に限られており、一般的結論を得るためにはさらに多くの波形について解析を行なう必要がある。

最後に、発破実験を実施するに当たり、宇部興産伊佐セメント工場採鉱部 今村威氏、秋山剛二氏はじめ多くの方に便宜を計っていただいた。また、計測機器を快く貸して下さった京都大学防災研究所 土岐憲三教授、日本化薬 空地公二氏山口大学工学部資源工学科 佐野修助手の諸氏に謝意を表する次第である。

参考文献
 [新版] 公害防止の技術と法規—振動編、通商産業省 立地公害局監修、1980。

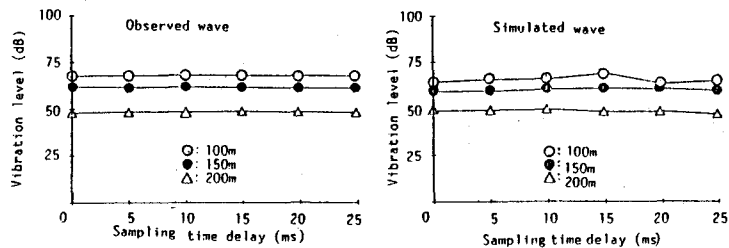


図-8 サンプルング間隔 (258 ms) の 図-9 サンプルング間隔 (258 ms) の移動に伴うレベルの変化

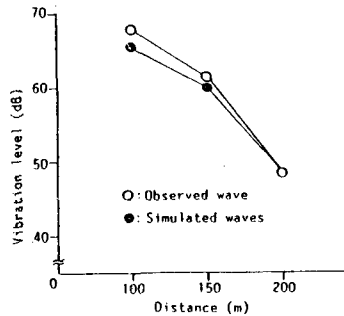


図-10 振動レベルの距離減衰

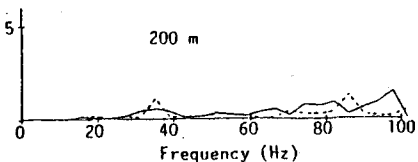
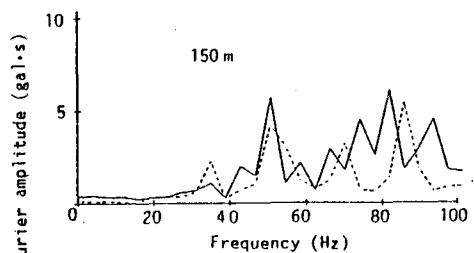
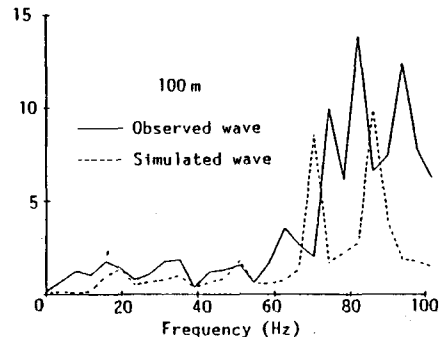


図-11 段発発破振動のフーリエスペクトル

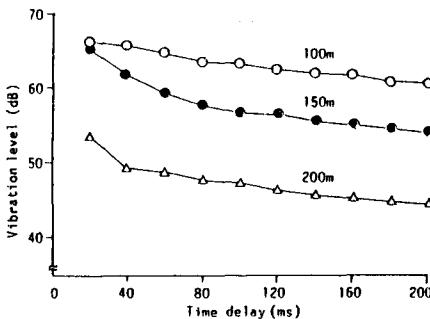


図-12 発破間隔と振動レベルとの関係

(52) EXPERIMENTAL STUDY ON ESTIMATION OF VIBRATION LEVEL

Koji NAKAGAWA, Fusanori MIURA, Sunao KUNIMATSU,
Mitsuhiro CHUMAN, Shinsaku HARADA

This study aims to find a rational method to reduce the level of vibration in pre-blasting. The vibration level (VL, unit is dB) is used to express the intensity of the blasting vibration here in stead of the peak particle velocity. It is regarded that pre-blasting is made up of a series of single-shot-blastings (SSB) with time delay, namely, delay-blasting (DB) in this study. Experiments were carried out to obtain vibration waves from both SSB and DB.

First, attenuation of VL with distance from the source to the observation stations was estimated and compared with that of the peak acceleration for SSB waves. The attenuation factor of the VL was about one-sixth of that of the peak acceleration. This low attenuation of the VL is attributed to the fact that the duration time increases as the distance increases.

As VL of the DB vibration depends on the time delay of SSB, it will be reduced by controlling the time delay. The dependency of VL on the time delay was examined by the artificial DB waves (ADB waves). ADB waves were made by superposing SSB waves with the same time delays as those of the experimentally obtained DB waves (EDB waves). The validity of the ADB wave was checked by comparing the wave form with that of the EDB wave. These two wave forms resembled closely each other. Finally, VLs were computed from ADB waves by parametrically changing the time delay from 20 to 200 ms. The relationship between VL and the time delay was discussed and it was found that the longer the time delay the lower the VL.