

振動レベルからみた発破振動に関する考察

国松 直*・中川 浩二*・三浦 房紀*・中満 光広**

Studies on the Vibration Level of Blasting Vibrations

Sunao KUNIMATSU, Koji NAKAGAWA, Fusanori MIURA and Mitsuhiro CHUMAN

Abstract

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.

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). First, 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. Second, VL s 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 . Finally, scattering of shooting time at each time delay was taken into consideration in ADB waves. There was little difference VL s obtained from ADB waves with shooting scattering and those without the scattering.

1. まえがき

従来より岩盤の破砕、掘削には低コストで破砕力が大きい火薬を用いた発破作業が頻繁に行なわれてきた。しかし、最近では環境条件が厳しくなり発破作業にともなう振動に対して種々の規制がとられるようになってきている。また、予想される発破振動にともなう種々の問題から建設工事が中断されるなどの事例も多くなっている。狭い国土に多くの人口を有し、しかも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る。従って発破振動の推定の重要性も益々増大するものと予想される。

発破振動による問題には2つの側面があり、第1は近接する既存構造物に対する耐衝撃性、耐震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。

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かなりの妥当性を有するものと考えられている。しかし、後者の問題には人体感覚が深くかかわっていることから周波数特性、継続時間にも強く影響を受け最大速度振幅だけでは不十分とされてきた。このような背景の下で昭和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るに至った。従って、今後は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も必要不可欠になるものと思われる。

* 建設工学科

** 名古屋大学大学院土木工学専攻

また一方で、露天掘鉱山などでは日常操業として大量の発破が行なわれており地域住民の苦情に対して振動レベルの推定および低減法について真剣に取り組まれているのが現状である。そこで、本研究では振動レベルの低減法の1つとして行なわれているゆるめ発破をとり上げ、段発発破の発破間隔が振動レベルに与える影響を明らかにすることを目的とした。研究の手法としては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⁾

我々の身体が振動を感じる感じ方(人体感覚)は極めて複雑であり、振動方向、振幅、周波数、継続時間に依存することが明らかにされている。周波数と水平、鉛直方向に対する人体感覚の関係を表す周波数レスポンスが Fig. 1 のように示されている。

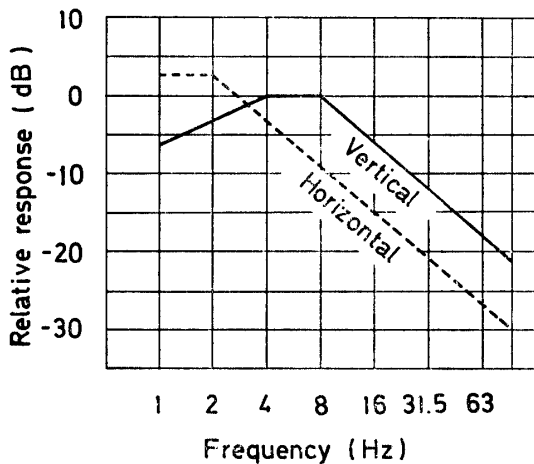


Fig. 1 Relative response dependence on frequency.

JIS (C-1510) では振動レベル (VL) を次のように定義している。

$$VL = 20 \log_{10} a/a_0 \tag{1}$$

ここに、 a_0 は基準加速度であり、 $a_0 = 10^{-5} \text{ m/s}^2$ としている。また、 a は振動感覚補正 (Fig. 1 参照) を行

なった加速度実効値であり、次式で与えられる。

$$a = \sqrt{\sum_n a_n^2} \times 10^{c_n/10} \tag{2}$$

ここに、 c_n は周波数 $f_n(\text{Hz})$ における相対レスポンスであり、周波数 f と Fig. 1 に示す関係があり。また、 a_n は周波数 $f_n(\text{Hz})$ の成分の振動加速度の実効値であり、次式で定義される。

$$a_n = \sqrt{(1/T) \times \int_0^T a_{fn}(t)^2 dt} \tag{3}$$

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。

ここで、積分時間 T が 0.2秒の場合を fast, 1.0秒の場合を slow と呼んでいる。

発破振動は一般に高周波成分が卓越していることが知られている。このことと Fig. 1 を考慮して、発破振動における振動レベルの規制は鉛直方向に対して行なわれるのが妥当である。そこで、本研究では鉛直振動をその解析の対象とした。

3. 発破実験およびその考察

3.1 実験内容

3.1.1 加速度波形の再現性についての実験

発破振動による波形は発破振源の状態、波の伝播経路、地質状況、地形等の様々な要因に影響された後に観測されるものである。そこで、ここではこれらの要因をできるだけ少なくするために、均質な岩盤で、地形の不規則性の影響を受けない十分に平坦な宇部興産伊佐石灰石鉱山内に実験を行なった。まず同一条件とみなせる振源より生じた発破振動による加速度波形に再現性があるかどうかを調べた。以後、これを実験 I と称する。

実験 I における発破規格を Table 1 に示す。また、発破孔 (●印) および発破番号を Fig. 2 に示す。観測点は発破孔 4 点の中央から 100m 離れた位置とした。

Table 1 Experimental conditions.

Exp.	Hole diameter, (mm)	Hole length, (m)	Number of holes	Chg./hole, (kg)
I	60	2.5	4	1 kg ANFO 0.9 kg 3-Kiri 0.1 kg
II	60	2.0	14	1 kg Akatuki 4/3 pieces
III	60	2.3	14	1 kg Akatuki 4/3 pieces

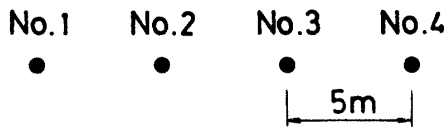


Fig. 2 Blasting hole array in Exp. I.

Table 2 Apparatus used in the experiments.

Accelerometer	Akashi	V401
Amplifire	San-eisokki KK.	6L5
Recorder	TEAC	R-61
AD converter	Iwatu	DM-305

発破は番号に従って左側から単発で行なった。使用した計測機器類を Table 2 に示す。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。

3.1.2 ゆるめ発破を想定した実験

段発発破においては各発破間の間隔が振動レベルに影響を及ぼすことが予想される。そこで、ゆるめ発破を想定した段発発破実験を行ない振動波形を観測した。ここでは単発発破が連続的に続くような段発発破を行なった。場所は上述した場所に隣接する地点である。実験は異なる発破間隔で2回行なった。以後、これらを実験Ⅱ、Ⅲと称する。実験における発破規格を Table 1 に示す。また、発破孔(●印)の配列を Fig. 3 に示す。各発破孔については以下において行列形式で呼ぶこととし、3行目の3列目の発破孔を(3, 3)のように表示することにする。図中の各行の数字は上側が実験Ⅱ、下側が実験Ⅲで用いた発破秒時(規格値ms)を表わしている。発破秒時からわかるように図中破線で区切られた2列目は段発発破、1列目と3列目

		COLUMN					
		SSB		DB		SSB	
		1		2		3	
ROW	1	●	●	●	●	●	●
		1500	0	20	40	60	1000
		1750	0	80	150	230	1250
2		●	●	●	●	●	●
		1500	0	40	80	125	1000
		1750	0	100	200	310	1250
3		●	●	●	●	●	●
		1500	0	60	125	200	1000
		1750	20	150	270	400	1250

5m

SSB Single-Shot-Blasting
DB Delay-Blasting

Fig. 3 The firing pattern (delay time: ms).

は単発発破とみなせるものである。また各行の間は十分な時間間隔をとっている。観測点は発破領域の中央から100m, 150m, 200m離れた位置とし、その位置に加速度ピックアップを石こうで固定して上下方向振動波形を観測した。

3.2 観測結果と考察

3.2.1 加速度波形の再現性について

実験Ⅰの4回の単発発破から得られた加速度波形を Fig. 4 に示す。上から発破番号 1, 2, 3, 4 の順であ

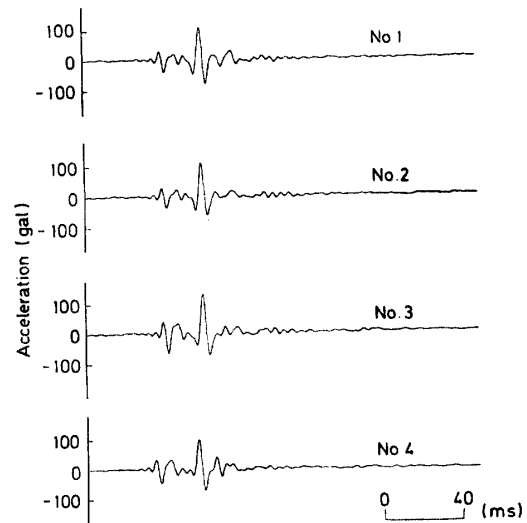


Fig. 4 Vibration records for Exp. I (accelerogram).

る。各波形はよく似ていることがわかる。これらの波形に対して相互相関係数を求めれば No. 1 と No. 2 の間で0.919, No. 2 と No. 3 の間で0.919, No. 3 と No. 4 の間で0.678という値が得られた。また、観測された加速度波形より振動レベル (fast) を算出した結果は No. 1 : 62.4 dB, No. 2 : 62.4 dB, No. 3 : 64.8, No. 4 : 62.9 dB であり平均値 63.1 dB に対して標準偏差は 0.99 dB となった。

以上より、単一振源により生じる基本的な発破振動波形は本実験場所内では十分に再現されると言えよう。

3.2.2 振動レベルの距離減衰

発破振動に対する苦情は発破振源より遠く離れた場所の地域住民より生じることから、振動レベルの距離減衰を調べる必要がある。このことは振動レベルの推定とも関連して重要な問題である。

実験Ⅱと実験Ⅲは異なる発破秒時で同じ実験を行なったものであるが実験日が違うため岩盤の状態(特

に、含水状態)が異なっていると考えられる。このことは、発破振動に影響を及ぼすと思われたので以後の解析では別々に行なった。本実験では加速度ピックアップを100m, 150m, 200mの3箇所に設置し発破振動の距離減衰について検討することを試みた。しかし、200m地点での観測はトラブルにより実験Ⅱの3行目における記録しか得ることができなかった。また、実験Ⅱの(1, 2)段発破については別のトラブルにより記録を得ることができなかった。

実験Ⅱの(3, 3)単発破における100m, 150m, 200m地点の各加速度波形を Fig. 5 に示す。距離の増加とともに振幅、高周波成分が減少し、主要動部が長くなっていることがわかる。Fig. 6 は実験Ⅱ, Ⅲの各観測点における各観測点での最大加速度と距離との関係を示したものである。一般に最大速度振幅の推定式は次式で与えられる²⁾。

$$V = K \cdot W^\alpha \cdot D^{-\beta} \quad (4)$$

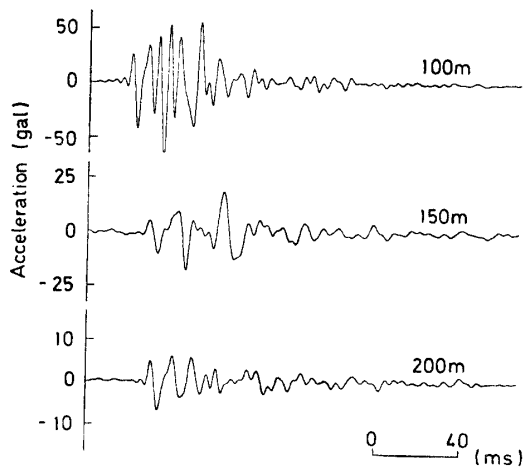


Fig. 5 Vibration records for Exp. II, single-shot-blasting (accelerogram).

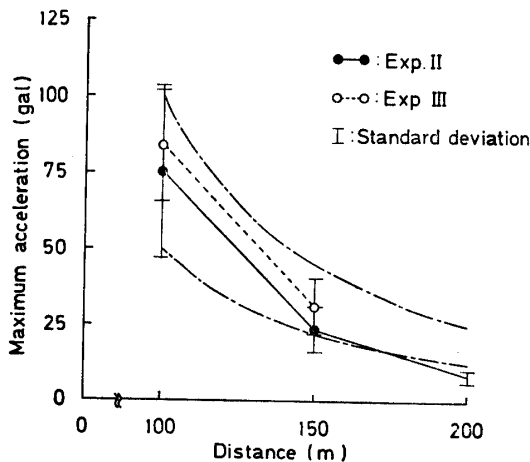


Fig. 6 Relationship between distance and maximum accelerations.

ここで、 K は使用する火薬類の種類や性能、発破条件、地盤条件によって定まる定数、 W は薬量、 D は爆源からの距離である。指数 α の値は1/2~3/4の範囲であり、指数 β の値はほぼ2.0の値をとる場合が多いようである。そこで、図中には1点鎖線で最大加速度の距離減衰を(4)式と同様に扱い $\beta=2$ の場合について記入している。ただし、ここでは100mで最大加速度が100および50galであると仮定している。

また、実験Ⅱの(3, 2)段発破における各観測点での加速度波形を Fig. 7 に示す。100m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となり、200m地点ではほぼ同程度の振幅が継続している。

次に、単発破により得られた加速度波形より算出した振動レベル (fast) と距離減衰の関係を Fig. 8 に示す。図中の実線は実験Ⅱ、破線は実験Ⅲについて得られた平均値であり標準偏差も併せて示してある。1

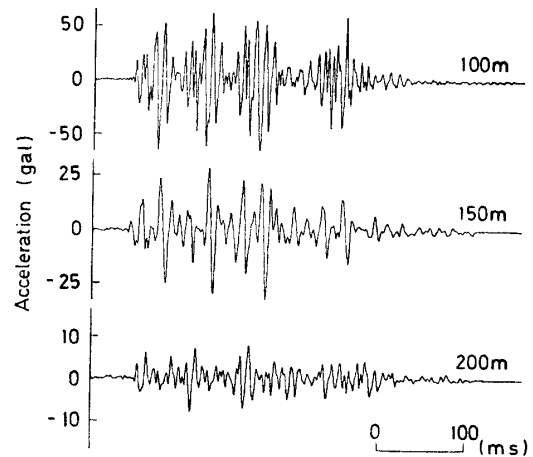


Fig. 7 Vibration records for Exp. II, delasting (accelerogram).

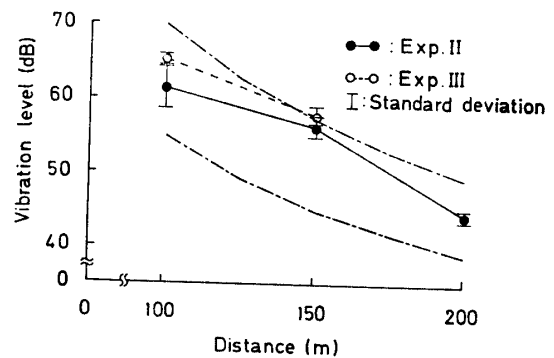


Fig. 8 Relationship between distance and vibration levels (fast), single-shot-blasting.

点鎖線は振動レベルの距離減衰を(4)式と同様に扱い $\beta=0.5$ の場合について記入したものである。ただし、ここでは100mで振動レベルが70および 55 dB と仮定している。Fig. 6 (1点鎖線は $\beta=2$ に対応) と比べると振動レベルによる距離減衰 ($\beta=0.5$ に対応) が小さいことがわかる。この理由は、距離の増加とともに振幅は低下する反面、継続時間はむしろ長くなり、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。最大速度振幅の推定には β 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は $\beta=0.5$ 程度であり、距離減衰を評価する場合には速度振幅の推定式の距離減衰に対する考え方は直接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。

3.2.3 発破秒時差が振動レベルに与える影響

実験Ⅱ、Ⅲの段発発破において各行の発破秒時差を実験Ⅱでは約 20, 40, 60 ms, 実験Ⅲでは約80, 100, 120 ms とした。Fig. 9 に実験Ⅱ、Ⅲにおける発破秒

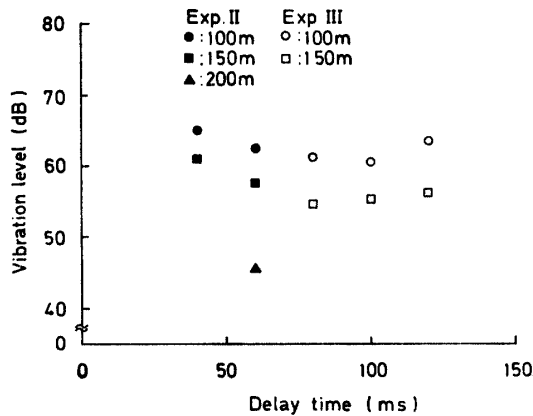


Fig. 9 Relationship between delay time and vibration levels (slow), delay-blasting.

時差と振動レベル (slow) との関係を示す。実験データが少ないため一般的なことは言えないが 120 ms の値を除いては若干右下がりの傾向があるように思われる。

4. シミュレーション波形による検討

4.1 シミュレーション波形による距離減衰の検討

本研究はゆるめ発破を対象とし発破秒時差を変えて合理的に振動レベルを低く押えるための最適の秒時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

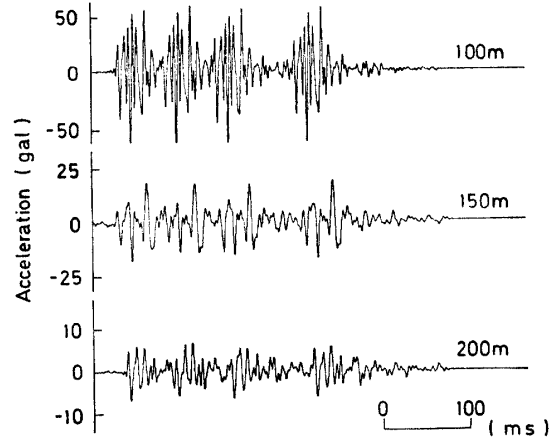


Fig. 10 Simulated delay blast vibration waves.

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した。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。このことはすでに実験Ⅰにおいて確かめられており、基本波形の重ね合わせによる波形のシミュレーションは妥当性を有するものと思われる。Fig. 10 は Fig. 5 に示した単発発破による波形を段発発破と同じ発破秒時差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。これを実際に観測された波形 (Fig. 7) とを比較すると、150m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、位相特性についていずれも良い一致がみられる。また振動レベルについては 2 dB 前後の差異がみられた。

ここで、実験Ⅰにおいては振動波形に非常に高い再現性が得られたが実験Ⅱ、Ⅲにおいては振動波形に類似性はみられるものの振幅に若干の差異がみられた。その結果がシミュレーション波形より算出した振動レベルに影響を与えるものと思われる。そこで、単発発破の全データを用いて段発発破による振動波形をシミュレートした。Fig. 11 に実験Ⅱの (3, 2) 段発発破の振動波形をシミュレートした波形より算出した振動レベル (slow) を示す。シミュレーション波形の作成に用いた波形は実験Ⅱの単発発破において各観測点で観測された波形であり100m地点では6ヶ、150m地点では5ヶ、200m地点では2ヶを使用している。図中の○印がシミュレーション波形による振動レベルの平均値であり、標準偏差も併わせて示している。●印は実験Ⅱの (3, 2) 段発発破による観測波形より算

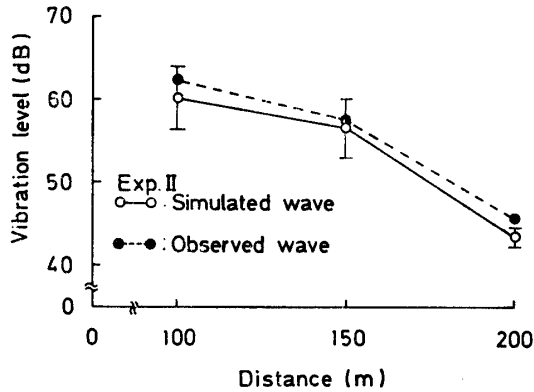


Fig. 11 Vibration levels (slow) obtained from recorded and simulated waves.

出した振動レベルである。Fig. 11 より若干シミュレーションによる結果が低いものの距離による減衰の傾向は一致している。また、標準偏差の上限を考えれば安全側で振動レベルを評価できるものと思われる。

4.2 発破秒時差が振動レベルに与える影響

発破秒時差と振動レベルの関係を検討した結果を Fig. 12, 13 に示す。Fig. 12 の振動レベルは実験Ⅱの単発発破において観測された各観測点の波形を一定間隔(秒時差に対応)でずらして重ね合わせたシミュレーション波形に対して fast で算出したものである。Fig. 13は同様に実験Ⅲについての結果である。

実際の発破では雷管の秒時差にはばらつきが考えられる。そこで、秒時 100 ms に対して標準偏差 6 ms の割合³⁾ でばらつきを正規乱数により与えたシミュレ

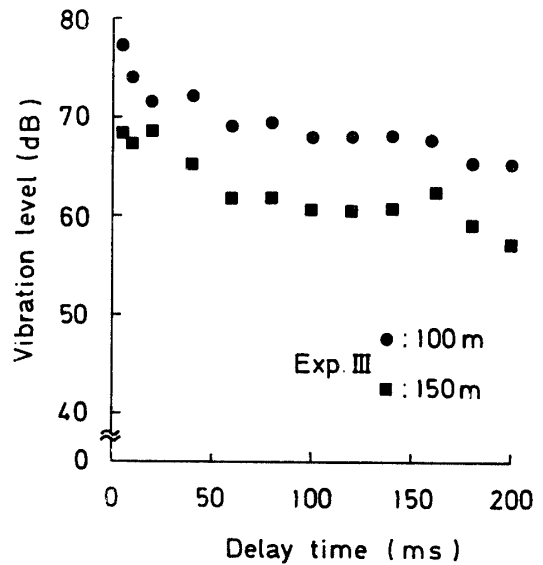


Fig. 13 Relationship between delay time and vibration levels (fast) obtained from simulated waves (Exp. III).

ーション波形に対して振動レベルを算出した結果を Fig. 14, 15 に示す。Fig. 14 は実験Ⅱ, Fig. 15 は実験Ⅲについての結果である。Fig. 12 と Fig. 14, Fig. 13 と Fig. 15 の両図にはほとんど差がなく秒時差のばらつきは振動レベルにほとんど影響を及ぼさないことがわかる。これらの図より秒時差が小さくなれば振動レベルが極端に高くなることが認められる。Fig. 9 に示した観測波形による結果とシミュレーション波形による結果には同様の傾向がうかがえるようである。こ

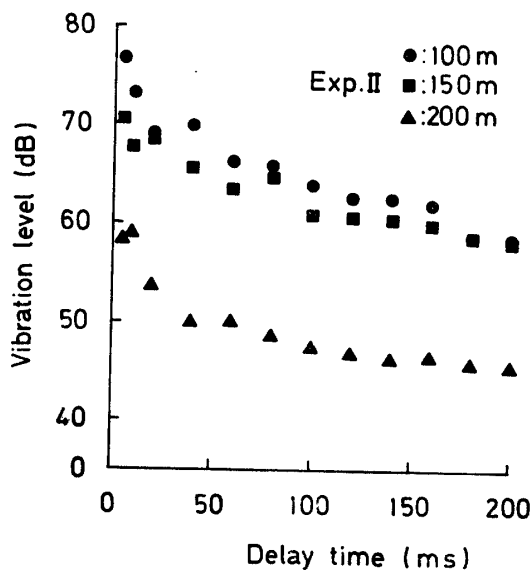


Fig. 12 Relationship between delay time and vibration levels (fast) obtained from simulated waves (Exp. II).

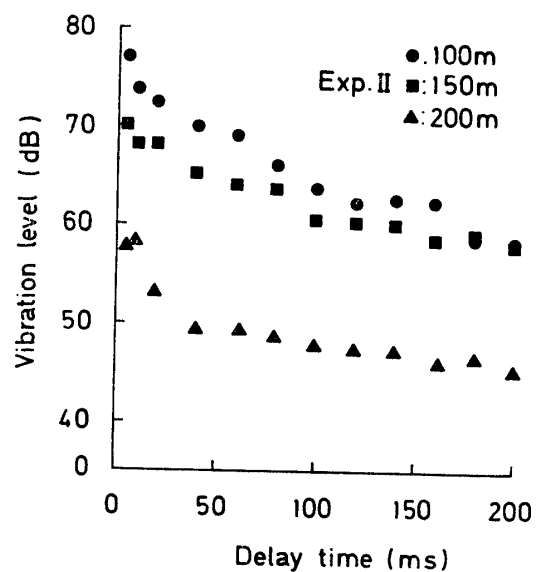


Fig. 14 Relationship between delay time and vibration levels (fast) obtained from simulated waves (Exp. II).

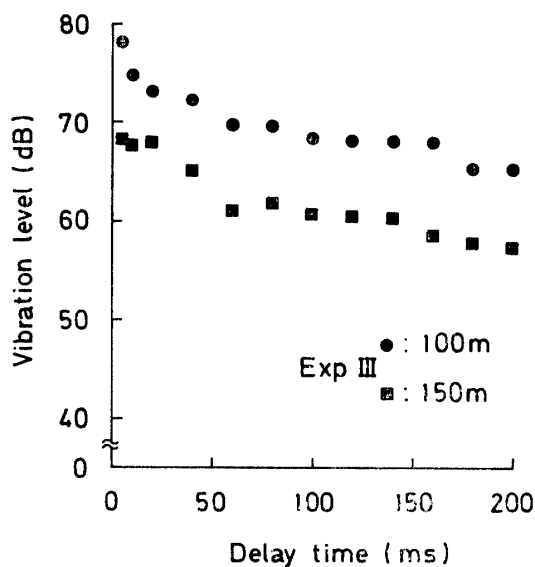


Fig. 15 Relationship between delay time and vibration levels (fast) obtained from simulated waves (Exp. III).

のような検討を行なうことにより振動レベルの規制値に対して有効な秒時差の値を推定することが可能となる。

5. あとがき

本研究は発破振動の振動レベルに影響を及ぼす発破秒時差について実験および計算機によるシミュレーションの両面より検討を行なった。

本研究により得られた主な結果は以下のようである。

(1) 同一発破条件で行なった単発発破による波形には振幅、位相特性、継続時間ともかなりの再現性がみられた。

(2) 距離の増加にともない最大加速度、振動レベルともに低下するがその低下の割合は振動レベルの方が小さい。これは、距離が長くなると振幅は低下するが、逆に継続時間はむしろ長くなり、結局パワーの低下は

振幅ほど大きくないためであると考えられる。

(3) (1)で述べたように単発発破による波形には再現性がみられる。そこで、単発発破によって得られた波形を実際の段発発破の秒時差で重ね合わせたシミュレーション波形を作成した結果、観測された段発発破における波形と振幅、位相特性、継続時間ともにより一致がみられた。このことより、シミュレーション波形による検討は有効となり得る可能性があることが判明した。

(4) シミュレーション波形による振動レベルと観測波形によるそれとは距離減衰に関しては同様の傾向を示すが振動レベルの大きさには若干の差が認められた。このことに関しては今後検討を行なっていく予定である。

(5) ゆるめ発破における秒時差が振動レベルに与える影響は秒時差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判明した。また、この傾向は秒時差がある標準偏差内で変動すると仮定しても同様の結果が得られ、秒時差のばらつきは振動レベルに影響を及ぼさないと考えよう。

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、原田晋作氏はじめ多くの方々に便宜を計って頂いた。また、計測機器を快く貸して下さった京都大学 土岐憲三教授、日本化薬 空地公二博士、山口大学工学部 佐野修博士の諸氏に謝意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 公害防止の技術と法規編集委員会編：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（1980）
- 2) 工業火薬協会編：発破ハンドブック、山海堂
- 3) W. J. Birch : Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. A : Min. industry), 92 (1983)

(昭和59年4月14日受理)