

## 段発発破における振動レベルの数値シミュレーション による推定

国松 直\*, 中川浩二\*, 三浦房紀\*, 今村 威\*\*

本研究は段発発破における発破振動レベルの推定式を提案することを目的として行ったものである。振動レベルは JIS 規格において JIS C 1510 を満足する振動レベル計の指示値により測定される。そこで、振動レベル計の特性について調べ、その特性を再現するための計算機によるシミュレーションプログラムを検討した。

そのプログラムを用いて振動波形が重畳しない範囲について、振動レベルに対する段発発破の秒時差の効果を検討し、段発発破における振動レベルの推定式の提案を行った。

### 1. 緒言

従来より、大型の建設機械、発破作業等を伴う建設工事に騒音、振動はつきものであるという考え方が定着している。しかし、近年トンネル掘削や宅地造成のためのこれらの作業が住宅地近傍で行われる機会が著しく増加し、そのため建設工事現場より発生する騒音、振動が公害問題としてクローズアップされてきた。公害問題としての立場より、建設工事に伴う騒音、振動はそれぞれ昭和43年、昭和51年に制定された騒音規制法、振動規制法による法的な規制を受けることになる。

しかし、この振動規制法においては、発破振動のように立ち上がり鋭く、かつ継続時間の短い振動に対しては規定がなされていない。このため、現実の問題として建設工事の主たる振動の一つである発破振動に対して自治体や住民と施工業者との間では、この振動規制法に示されている振動レベルにより取り決めがなされることが多い。そこで、発破振動の規制においても振動レベルの考え方は現実の問題として対処しなければならないものとなっている。

発破による岩盤掘削を含む施工計画を立てるに際して、既存構造物に対する影響や振動公害といった発破振動が問題とされる可能性がある場合にはその予測が必要となる。発破振動の予測は、従来振動が既存構造物に与える影響について多く問題にされてきたため、その評価法として優れている振動速度に関するものは

しばしば行われているが、公害振動を評価するための振動レベルに関する合理的なものはほとんど見られないようである。特に振動レベルの予測においては、振動速度の場合における主たる原因である爆源からの距離と薬量のほかに段発発破における秒時間隔が問題となる。今日発破振動を制御するための手段として、多段の段発を可能にするための発破器の開発や秒時制御のための電子制御雷管の開発などがみられる。これらを勘案すると、振動レベルの予測を段発発破の秒時間隔の影響をも考慮して行うことは特に重要であると考えられる。

本研究は以上のことからまず振動レベル計の特性を明らかにし、これを数値的にシミュレートするための計算機プログラムを検討した。続いて振動レベルの定義に従い、また開発したプログラムを用いた解析により段発発破の発破振動レベルを推定する式を提案した。

### 2. 振動レベルおよび振動レベル計

JIS Z 8735 (振動レベル測定方法) では JIS C 1510 (振動レベル計) で定められた振動レベル計を用いて、その指示値により振動レベルを測定することが規定されている。

JIS C 1510 では、振動レベル (VL) を次のようにデシベルで定義している。

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

ここで、 $A_0$  は基準の振動加速度であり、 $A_0 = 10^{-4} \text{ m/s}^2$  である。また、 $A$  は人体が振動を感じる感じ方 (人体感覚) に対して補正を行なった加速度実効値であり、次式で与えられる。

$$A = \left[ \sum A_n^2 \cdot 10^{c_n/10} \right]^{1/2} \quad (2)$$

ここに、 $A_n$  は周波数  $f_n$  (Hz) 成分の振動加速度実効値であり、 $c_n$  は周波数  $f_n$  (Hz) に対する補正值 (相

昭和60年7月1日受理

\*山口大学工学部建設工学科

〒755 山口県宇部市常盤台

TEL 0836-31-5100 内線 544, 255, 383

\*\*宇部興産㈱伊佐セメント工場

〒759-22 山口県美弥市伊佐町伊佐

TEL 08375-2-1212 (代)

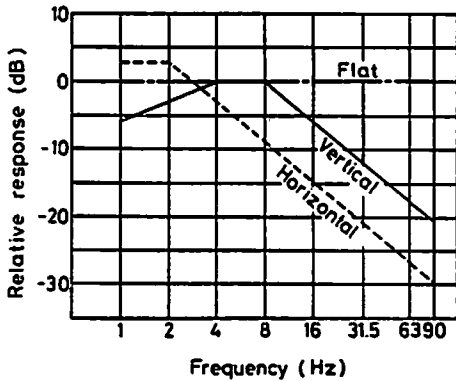


Fig. 1 Frequency characteristics of the relative response.

対レスポンス)を表す。この相対レスポンスは周波数に依存し、Fig. 1に示すような周波数特性を有する<sup>1)</sup>。従って、振動レベル計はこの周波数に対する補正のために Fig. 1の特性をもつ振動感覚補正回路を備えていなければならないと規定されている。振動レベル計自体は鉛直、水平の両特性を備えているものであるが、振動規定に用いられるものは鉛直振動のみである。

一方、衝撃正弦振動の継続時間と人体が感じる振動の大きさとの間には実験的に Fig. 2に示すような関係があるとされている<sup>1)</sup>。JIS C 1510 および同解説によると振動レベル計の指示特性はこの実験結果をもとに整流回路の平滑時定数が 0.6 秒に相当する特性を持つように規定されている。Fig. 2において時定数 0.6 秒に相当する指示特性は破線(比較的高周波成分)と実線(比較的低周波成分)とのほぼ中間のレスポンスをもつことになるようである。

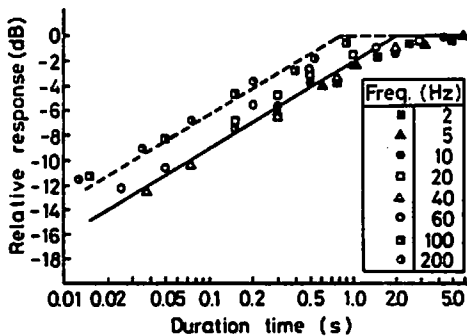


Fig. 2 Response for the single tone burst signal.

このように、振動レベルの定義は人体感覚をもとに数学的に規定されたものであり、また振動レベル計はこの規定を近似的に電気回路により表現するものである。従って、これらの値が必ずしも一致するとは言

えず、さらに必ずしも人体感覚をも忠実に表わすものといえない。しかしながら、前述のように JIS 規格では振動レベルは振動レベル計の指示値で規定されているため、振動レベルを論じるにはまず振動レベル計の特性を十分に把握しておく必要がある。

### 3. 振動レベル計とその特性のシミュレーション

振動レベル計は加速度ピックアップにより検出された信号を上記の特性に従って振動レベルとして定量化するための装置である。そのため前述のように振動レベル計は振動感覚補正回路と指示特性回路を有している。いまこれをシミュレートするためには両回路をそれぞれシミュレートすることが必要となる。本研究では、北村ら<sup>2)</sup>により開発された振動感覚補正回路シミュレーションに指示特性回路のシミュレーションを加えて総合し、与えられた加速度信号に対して発破振動レベルを算出する計算機プログラムを作成した。

#### 3.1 振動感覚補正回路のシミュレーション

北村らは線型デジタルフィルター理論を用いて振動レベル計をシミュレートする方法を示している。しかし、このシミュレーションにおいては立ち上がり特性に問題があると述べられている。そこで、本研究では北村らにより誘導されたシミュレーション式のうち炉波器回路、振動感覚補正回路のシミュレーション部分である以下の差分方程式のみを用いた。

##### a) 炉波器回路

振動レベル計が 90 Hz 以上の周波数に対して次式を用いる。

$$y_n = (1 - 2e^{-a\Delta t} \cos(a\Delta t) + e^{-2a\Delta t}) x_{n-1} + 2e^{-a\Delta t} \cos(a\Delta t) y_{n-1} - e^{-2a\Delta t} y_{n-2} \quad (3)$$

ただし、 $x_n$ 、 $y_n$  はそれぞれ  $n$  ステップ目の入力および出力系列、また  $a = 400.3345$  である。

##### b) 振動感覚補正回路

Fig. 1 の周波数に対する相対レスポンスを次式で表す。

$$y_n = Kx_n - Ke^{-c\Delta t} \{ \cos(b\Delta t) + (c/b) \sin(b\Delta t) \} x_{n-1} + 2e^{-c\Delta t} \cos(b\Delta t) y_{n-1} - e^{-2c\Delta t} y_{n-2} \quad (4)$$

ただし、 $b = 11.0585$ 、 $c = 26.0328$ 、また  $K$  は利得を 1 にするための定数である。

ここでは定数は北村らによって与えられた値をそのまま用いているが、検討の結果、上式の特性は JIS 規格に規定された各周波数に対する許容値を十分に満足していることが認められた。

#### 3.2 指示特性のシミュレーション

振動レベル計の指示特性回路は整流回路および指示計回路からなる。波形は整流回路（実効値をとるための回路）で全波整流の後、コンデンサーによって平滑化されて指示計の入力となる。また、指示計は可動コイル形計器で、目盛りを対数目盛りとして指針の振れ角をdBで読み取るものである。この指示特性回路を簡単に表すために、佐々<sup>3)</sup>が数値計算によりそのシミュレーションを行なった回路を若干修正し、本研究で用いたものがFig.3である。

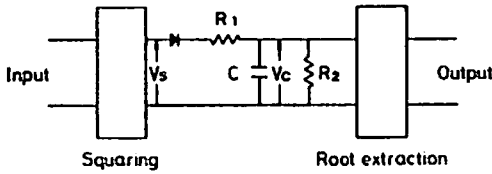


Fig. 3 Electric circuit for simulation of the vibration level meter.

Fig. 3の回路において、自乗された入力電圧を $V_s$ 、コンデンサー電圧を $V_c$ とすれば、以下に示す式に従って時間領域で現時間ステップの $V_c$ を求め、その $V_c$ の平方根の値を算出することによって指示特性のシミュレーションが可能となる。

a) 立ち上がり特性

$$(V_s \cdot R_2 / (R_1 + R_2)) \geq V_{c0}$$

$$V_{cn} = (V_s \cdot R_2 / (R_1 + R_2) - V_{c0}) (1 - e^{-\Delta t / \tau_1}) + V_{c0} \quad (5)$$

ここで、 $V_{cn}$ は現時間ステップのコンデンサー電圧  
 $V_{c0}$ は前時間ステップのコンデンサー電圧  
 $\tau_1$ は時定数であり、 $\tau_1 = CR_1 R_2 / (R_1 + R_2)$   
 $c$ はコンデンサー容量、 $R_1$ 、 $R_2$ は抵抗、 $\Delta t$ は時間間隔

b) 立ち下がり特性

$$(V_s \cdot R_2 / (R_1 + R_2) < V_{c0})$$

i)  $V_s \geq V_{c0}$

$$V_{cn} = (V_{c0} - V_s \cdot R_2 / (R_1 + R_2)) e^{-\Delta t / \tau_1} + V_s \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \quad (6)$$

ii)  $V_s < V_{c0}$

$$V_{cn} = V_{c0} e^{-\Delta t / \tau_2} \quad (7)$$

ここで、 $\tau_2$ は時定数であり、 $\tau_2 = CR_2$

$C$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ に関しては、作成したプログラムに正弦波振動を入力し、振動レベル計が示す立ち上がり特性および立ち下がり特性を最もよく表す値を試行錯誤的に求めればよいことになる。本研究では計量法検定合

格品である振動レベル計（リオン社製、VM-14B）を用いて検討を行なった結果、 $c=100\mu F$ 、 $R_1=30k\Omega$ 、 $R_2=9.3k\Omega$ を得た。以下の解析ではこれらの値を使用した。

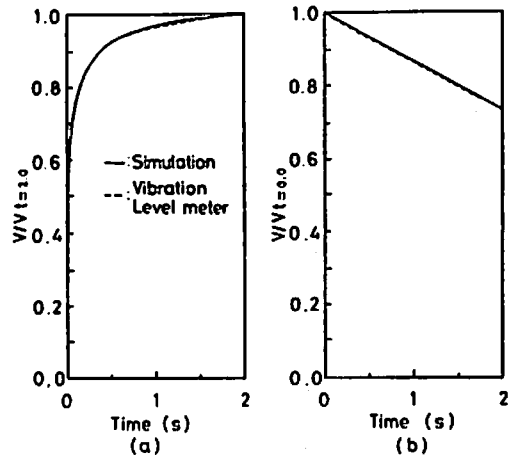


Fig. 4 Comparison of the characteristic of the vibration level (---) with the result of numerical simulation (—).

a) rising characteristic

b) attenuation characteristic

Fig. 4 a) は前記振動レベル計に周波数50Hzの正弦波を入力した瞬間からの指示値（破線）、および上述したプログラムを用いて同一条件の正弦波形に対して求めた結果（実線）を2秒後の値で規準化して比較したものである。また、Fig. 4 b) は50Hzの正弦波形入力を停止した瞬間からの両者の値を停止した瞬間の値で規準化して示したものである。このように、計算結果は立ち上がり特性および立ち下がり特性ともに非常によく振動レベル計の指示特性を再現しているといえる。

#### 4. 秒時差変化に伴うモデル波形の振動レベルの変化

段発発破による加速度波形は瞬接孔の爆破による破壊の影響が同一であると仮定すれば、秒時差がある程度長く、各発破により生じる波形が重畳しない範囲については、段発発破により生じる加速度波形がある秒時差で繰り返されたものと考えてよからう。

まず、ここでは現象を単純化するために単発発破により生じる加速度波形の代わりにある継続時間を持つ正弦波形（以下単発発破のモデル波形と称する）を用いて、段発発破を間欠正弦波形（以下モデル波形と称する）で表すこととした。すなわち、段発発破の秒時差が一定で、無限に同一の段発発破が続くものと仮定

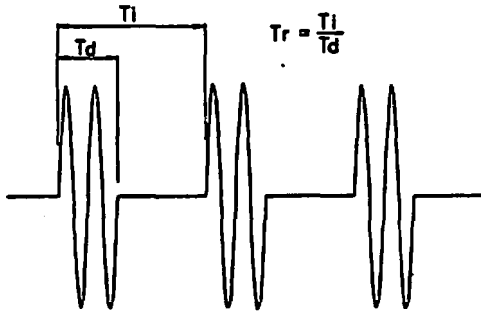


Fig. 5 Intermittent sine wave (model wave).

した間欠正弦波形を用いて、秒時差が振動レベルに与える影響を数値計算プログラムにより検討した。

Fig. 5はモデル波形を示したものであり、図中の $T_d$ は単発発破のモデル波形の継続時間、 $T_i$ は段発発破の秒時差を表している。単発発破振動により観測される加速度波形にはいろいろな周波数が含まれ、継続時間も一定ではない。また、振動レベル計の振動感覚補正特性はFig. 1に示したように1 Hz~90 Hzの範囲で規定され、それ以外では12 dB/octの遮断特性を持たせることが望ましいとされている。これらのことを勘案して、周波数20, 50, 80 Hzの3種類、継続時間 $T_d$ は波数を変化させることにより20ms~150msの種々の波を単発発破のモデル波形として用いた。

これらのモデル波形に対して、秒時差 $T_i$ と継続時間 $T_d$ の比、 $T_r = T_i/T_d$ をパラメータとして、 $T_r$ の増加に対するモデル波形についての振動レベルの低減を調べた。ここで、 $T_r = 1$ は連続正弦波形であり波形が重畳しない範囲では最大の振動レベルを示す。そこで、この値を基準として他の $T_r > 1$ における振動レベルに対する差（以下レベル差( $\Delta VL_d$ )と称する)を求めた。ここで、Fig. 6の実線はモデル波形入力( $T_i = 200$  ms,  $T_d = 40$  ms, 周波数50 Hz, 振幅は実効値で1000

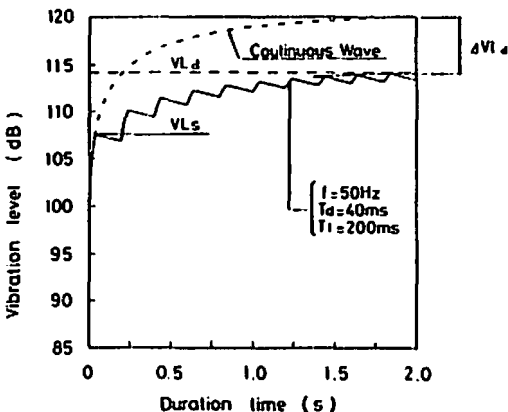


Fig. 6 Examples of simulation result.

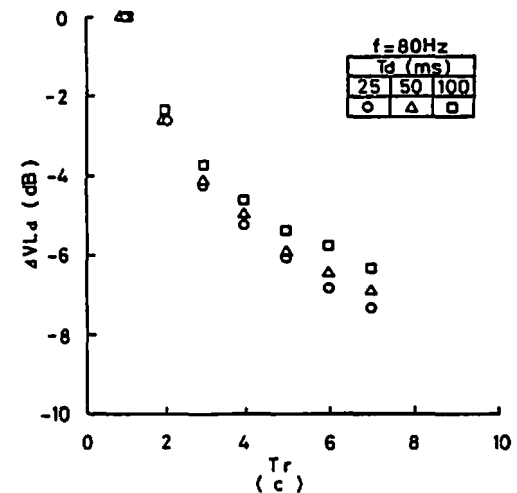
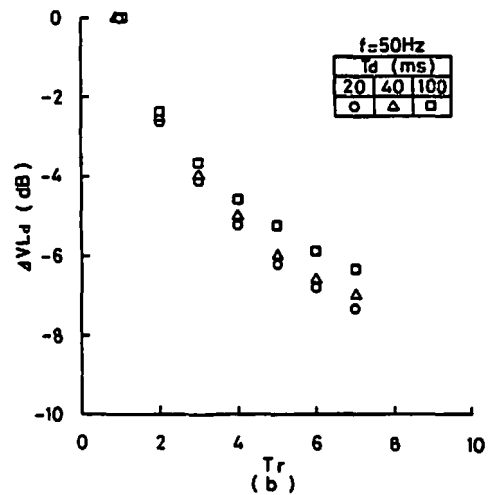
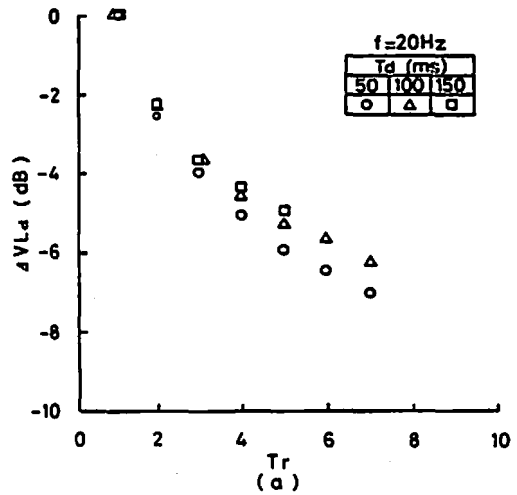


Fig. 7 The relationship between  $T_r$  and  $\Delta VL_d$  for the model waves. a)  $f = 20$  Hz, b)  $f = 50$  Hz, c)  $f = 80$  Hz

gal) に対する振動レベルシミュレーション結果を示したものである。また、図中の破線は  $T_r=1$  の連続正弦波入力に対するシミュレーション結果であり、2秒後ではほぼ120dBに達していることがわかる。モデル波形に対して振動レベルは  $Td$  区間で上昇、( $T_r - T_d$ ) 区間で下降を繰り返しながらある一定値へ漸近する。Fig. 2 に示されているように、継続時間が2秒以上ではほぼ一定値と人体が感じることを勘案して、ここでは波形入力時から2秒後の値を段発発破の振動レベル (VLd) とした。

Fig. 7 a)~c) は各周波数の単発発破のモデル波形について継続時間をパラメータとして  $T_r$  の増加に伴うレベル差を示したものである。これらの図はすべて  $T_r$  の増加に伴い右下がりの傾向を示し、 $T_r$  の増加が振動レベルの低減に有効に作用していることを表している。

ここで、周波数の影響を同一継続時間 ( $T_d=100\text{ms}$ ) についてみれば、 $T_r=7$  に対して20 Hzでは-6.3dB、50 Hzで-6.4dBとほとんど差がなく、レベル差の低減に対して周波数の影響は小さいものと思われる。また、継続時間の影響を同一周波数 (Fig. 8,  $f=50\text{Hz}$ ) についてみれば、 $T_r=7$  に対して  $T_d=20\text{ms}$ では-7.4

dB,  $T_d=40\text{ms}$ で-7.0dB,  $T_d=100\text{ms}$ で-6.4dBと  $T_d$  の増加に伴いレベル差は小さくなる傾向がみられる。

### 5. 秒時差変化に伴う実振動波形の振動レベルの変化

石灰石岩盤上で記録した単発発破の加速度波形<sup>4)</sup>を用いて振動レベルに及ぼす秒時差の影響について検討を加えた。用いた加速度波形は薬量1kgの発破による発破振動を爆源から100, 150, 200m離れた地点で観測したものである。

実振動波形 (以下実波形と称する) は単発発破のモデル波形のように波形の継続時間を明瞭に判別することができない。そこで、振動感覚補正を行なった後の波形に対して、耐震工学の分野で広く用いられている Vanmarcke and Lai<sup>9)</sup>により提案された次式を用いて継続時間を決定した。

$$Td = (2.74)^2 I_0 / (A_{max})^2 \times 1000 \quad (8)$$

ここで、 $T_d$ は継続時間 (ms),  $I_0$ は全振動エネルギー ( $\text{cm}^2/\text{s}^3$ ),  $A_{max}$ は加速度の最大値 ( $\text{cm}/\text{s}^2$ ) である。また、 $I_0$ は  $A(t)$ を加速度の時刻歴として次式で与えられる。

$$I_0 = \int_0^{t_0} A^2(t) dt \quad (9)$$

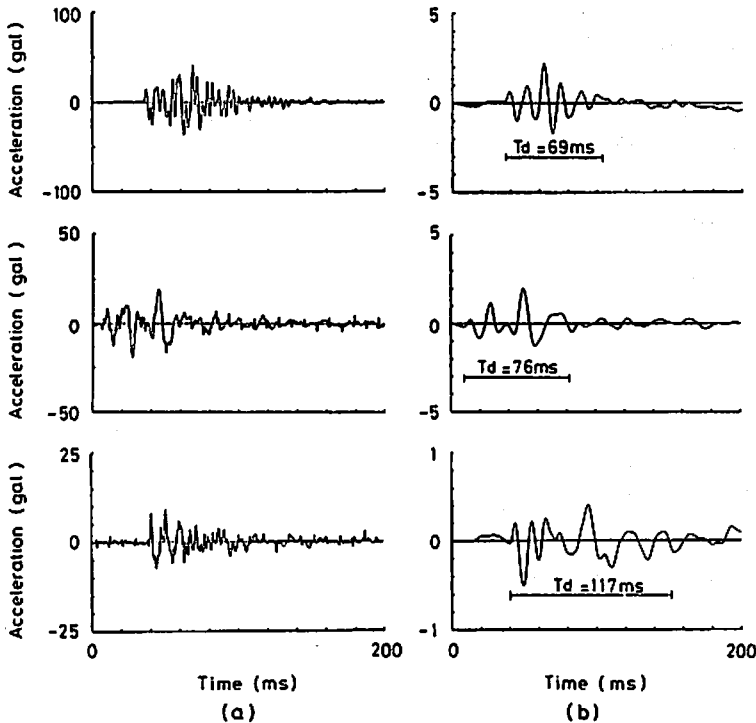


Fig. 8 Observed waves and their duration time.  
a) observed waves b) duration time of accelerograms corrected for the vibration level

Fig. 8に振動感覚補正を行なう前および行なった後の実波形の一例を示す。後者に対しては式(8)より得られた継続時間も併せて示している。この継続時間を用いて段発発破のモデル波形と同様に  $T_r$  に対するレベル差を求めた結果を Fig. 9に示す。この結果は  $T_r$  の増加に伴いレベル差が大きくなること、また  $T_d$  が増加すればレベル差が小さくなることなどモデル波形で得られた結果と同様の傾向を示している。

## 6. 秒時差を考慮に入れた振動レベルの推定

### 6.1 振動レベルの推定

従来の発破振動の推定式は最大速度振幅 (PPV) をその対象としており、一般的に次式のように書き表される<sup>6)</sup>。

$$PPV = KW^\alpha D^{-\beta} \quad (\text{cm/s}) \quad (10)$$

ここで、Kは使用する火薬の種類や性能、発破条件、地盤条件によって定まる定数、Wは雷管の段当りの総装薬量 (kg)、Dは爆源からの距離 (m) である。 $\alpha$ の値は通常0.5~1.0の範囲であり、 $\beta$ の値は2.0前後の値をとる場合が多いようである。

最大速度振幅と振動レベルとの間には入力を連続正弦振動とした場合、8Hz以上では理論的に次式が成立する。

$$VL = 20 \log_{10}(PPV) + 91 \quad (11)$$

このことから、振動レベルの推定は一般に上式を変形した次式により行われているようである。

$$VL = (91 + 20 \log_{10} K) + 20\alpha \log_{10} W - 20\beta \log_{10} D \quad (12)$$

しかし、式(11)はあくまでも連続正弦振動をその対象としており、発破振動のように一過性の波動に対しては過大な評価を与えることになる。また、式(12)を段発発破へ適用することに対しては合理性に欠ける。そこ

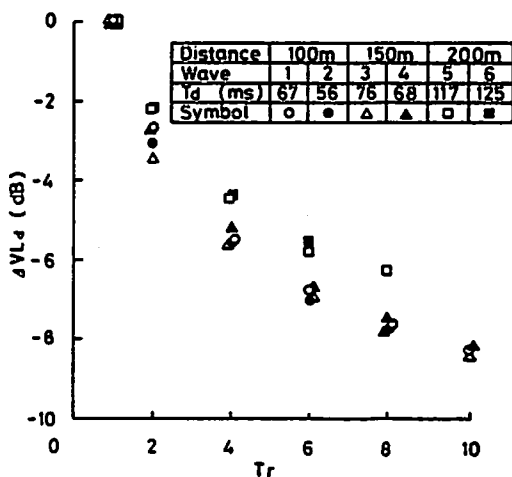


Fig. 9 The relationship between  $T_r$  and  $\Delta VLd$  for the observed waves

で、段発発破の振動レベルの推定式として秒時差の効果を含めて新たに次のような式を考えることにする。

$$VLd = VL_{Tr=1} - \Delta VLd \quad (13)$$

上式において、 $T_r = 1$ に対する振動レベル ( $VL_{Tr=1}$ ) は単発発破の振動レベル ( $VLs$ ) と波形の継続時間に密接に関連していることが考えられる。Fig. 10は縦軸に  $T_r = 1$ に対する振動レベルと単発発破に対する振動レベルの差 ( $VL_{Tr=1} - VLs$ ) をとり、横軸に継続時間をとってプロットした結果である。ここで○印はモデル波形、●印は実波形を表す。

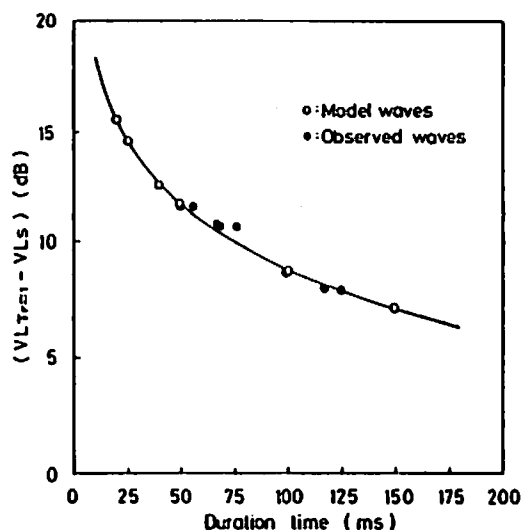


Fig. 10 The relationship between duration time and  $(VL_{Tr=1} - VLs)$ .

この図よりこれらの関係は一つの曲線で近似できることがわかる。そこで、Fig. 10のモデル波形の結果に対して回帰分析を行った結果、次のような ( $T_r = 1$ に対する振動レベル) の推定式が得られた。

$$VL_{Tr=1} = VLs + (28.1 + 9.69 \log_{10}(1/Td)) \quad (14)$$

なお、回帰式を求めるにあたって使用した波形の継続時間は20ms~150msである。

次に、式(13)の第2項 (段発発破の秒時差による振動レベル差 ( $\Delta VLd$ )) の推定式としては次式で表すことができよう。

$$\Delta VLd = D \log_{10}(1/T_r) \quad (15)$$

この係数DはFig. 7a)~c)の結果より  $T_d$  と密接に関連していると想像される。そこで、Fig. 7a)~c)の結果に対して各継続時間について回帰分析を行なった。その結果、係数Dの値を継続時間に対してプロットした結果がFig. 11である。これより係数Dは継続時間に対して直線で近似できるようである。

なお、図中の●印は実波形を用いて得られた係数D

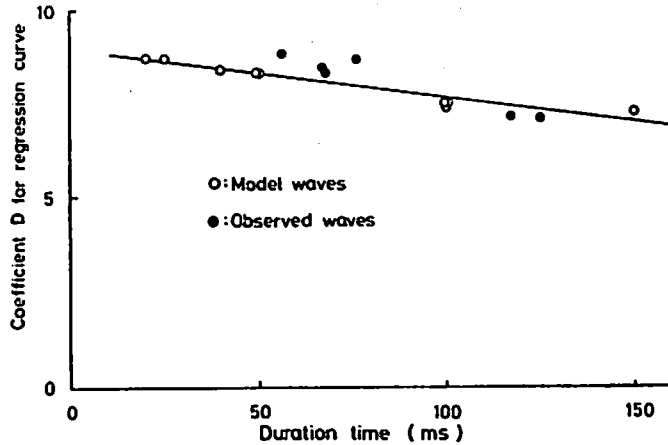


Fig. 11 The relationship between duration time and coefficient  $D$  for regression curve.

であり、回帰直線の回りに分布していることがわかる。モデル波形に対する Fig. 11 の回帰式は次式となる。

$$\text{式(4)の係数 } D = (-0.0128Td + 8.97) \quad (4)$$

上式を式(4)へ代入すれば結局、レベル差は  $T_d$  と  $T_r$  をパラメータとして次式を要する。

$$\Delta VLd = (-0.0128Td + 8.97) \log_{10}(1/T_r) \quad (5)$$

以上のような検討より、段発発破の秒時差が一定で、無限に同一の段発発破が続くものと仮定したとき、初段の起爆から2秒後 (Fig. 2より人体感覚上2秒以降は一定の振動レベルと感じる) の段発発破の振動レベル ( $VLd$ ) の推定式は式(3)に式(4), (5)を代入して結局、次式で与えられる。

$$VLd = VLs + (28.1 + 9.69 \log_{10}(1/Td) + (-0.0128Td + 8.97) \log_{10}(1/T_r)) \quad (6)$$

上式中の  $VLs$  (単発発破の振動レベル) および継続時間  $T_d$  は通常行われる試験発破において得ることができる。その結果を用いて、上式から  $T_r \geq 1$  の、ある秒時差に対する振動レベルを推定することができる。

式(4)より段発発破の振動レベルを算出するためには波形の継続時間と秒時差が必要である。単発発破の発破振動の継続時間は、最近よく発破振動レベルが問題とされる爆源からの距離が100m~200mの場合、およそ100ms程度となることが多いようである。いま、波形の継続時間を100msと仮定すれば式(4)は秒時差のみを変数とした次式で表される。

$$VLd = VLs + 24.1 - 7.69 \log_{10} T_i \quad (7)$$

上式は Fig. 7(a)~(c)、9にみられたようにレベル差が  $T_d$  にそれほど大きく影響されないことを考えれば他の  $T_d$  に対する誤差は小さいものといえる。

発破計画に当たっては試験発破により単発発破の振

動レベルを算出した後、式(7)を用いて  $T_i$  と段発発破の関係より規制値を満足する  $T_i$  を決定すればよいといえる。

ただし、式(7)は  $T_d = 100\text{ms}$  と仮定しているので  $T_i \geq 100\text{ms}$  を満たさなければならない。また、極端に大きな  $T_i$  を代入すれば式(7)は成立しなくなり、段発発破の振動レベルを2秒後の値で定めていることより  $T_i < 2000\text{ms}$  という条件が必要である。

## 7. 結論

発破振動に伴う振動公害を振動レベルで規制することが多くなり、振動レベルの低減法および推定式の確立の必要性がこれに伴って高まってきている。最大速度振幅の低減法には従来より段発発破が用いられ効果をあげているが、段発発破が振動レベルに与える影響、特にその秒時差が振動レベルに与える影響についてはいままでも明らかにされていなかった。

そこで、本研究はこの点に関して検討を加えるため、まず JIS C 1510 に規定されている振動レベル計をシミュレーションするためのプログラムを検討し、モデル波形および実波形を用いて振動レベルにおよぼす秒時差の影響を調べ、その結果に基づいて段発発破に対する振動レベルの推定式を提案したものである。

その結果、段発発破の秒時差 ( $T_i$ ) が一定で、秒時差に対する単発発破の継続時間の比 ( $T_r$ ) が1以上で、無限に同一の単発発破が続くと仮定したときの2秒後の振動レベルの推定式は  $T_d = 100\text{ms}$  と仮定すれば次式で与えられる。

$$VLd = VLs + 24.1 - 7.69 \log_{10} T_i \quad (100\text{ms} < Td < 2000\text{ms})$$

発破計画に当たっては試験発破により単発発破の振

動レベルを算出した後、上式を用いて  $T_i$  と段発発破の振動レベルの関係より規制値を満足する  $T_i$  を決定すればよいといえる。

本研究では波形が重畳しない範囲について検討を行ったが今後は波形が重畳する範囲について検討を行う必要があるとともに、単発発破の振動レベルの推定が大きな課題といえる。

#### 謝 辞

本研究の遂行に当たり、宇部興産㈱伊佐セメント工場、秋山剛二、原田晋作両氏はじめ、採鉱一課の諸氏には多大な協力を頂いた。振動レベル計のシミュレーションプログラムの作成に当たり、山口大学工業短期大学部情報処理工学科、古賀和利講師には多くの有益な助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す次第である。

#### 文 献

- 1) たとえば、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) 北村泰寿・桜井春輔・繁縄章吾、第39回土木学会年次学術講演会概要集、第Ⅲ部門、885～886（1984）
- 3) 佐々宏一、物理探鉱、34、16～23（1981）
- 4) 国松 直・中川浩二・三浦房紀・中満光広、山口大学工学部研究報告、35、121～127（1984）
- 5) Vanmarcke, E. H. and Lai, S. P., Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 70, 1293～1307（1980）
- 6) たとえば、工業火薬協会編、「発破ハンドブック」、山海堂（1976）

---

### Estimation of the Vibration Level of Delay Blasting Vibrations by the Numerical Simulation

by Sunao KUNIMATSU\*, Koji NAKAGAWA\*, Fusanori MIURA\*,  
and Takeshi IMAMURA\*\*

The purpose of this study is to propose a new predictor of the vibration level of blasting vibrations. The level must be measured by a vibration level meter that satisfies JIS (JIS C 1510). We first researched the response characteristics of the level meter, and developed a computer program which could simulate those characteristics. Using the program, we investigated the effect of the delay on the level. In the investigation, we assumed that the delay blasting was made up of a series of single shot blasting with a time delay. Intermittent sine waves were used idealized delay blasting waves as well as observed waves.

On the assumption that time delay is longer than duration time, we proposed a new practical predictor for the vibration level.

(\*Faculty of engineering, Yamaguchi university, Tokiwadai, Ube City,  
Yamaguchi, 755, Japan.

\*\*Isa Cement Factory, Ube Industries LTD., Isa, Mine City  
Yamaguchi, 759-22, Japan.)