

発破振動における振動レベルの推定

ESTIMATION OF THE VIBRATION LEVEL OF BLASTING VIBRATIONS

国松 直*・中川浩二**・三浦房紀***・今村 威****

By Sunao KUNIMATSU, Koji NAKAGAWA, Fusanori MIURA
and Takeshi IMAMURA

This study aims 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 as idealized delay blasting waves as well as observed waves.

On the assumption that frequency is more than 8 Hz, and time delay (T_d) is longer than duration t_i , we proposed a new practical predictor for the vibration level as a function of T_d and peak particle velocity (PPV). The PPV is easily estimated from the well known predictor.

緒 論

発破振動はその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。そのため発破振動の評価法としては、振動速度（粒子速度）が問題にされ、かつその予測方法が多く検討されてきた。これは構造物に与える影響の評価には振動速度によることが最も適切であるとされてきたためである。しかし、近年住宅地近傍でのトンネル掘削や宅地造成などにおいて、発破による岩盤掘削が行われる機会が著しく増加してきている。このため構造物に実質的な被害が生じるかどうかよりも、住民が発破振動に対して感じる不快感の許容範囲をどのように考えるかという公害振動の立場からの取り扱いが多くなってきている。

振動規制法においては発破振動のように立ち上がりが鋭く、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。しかし、現実の問題として自治体や住民と施工業者との間には、この振動規制法に示される振動レベルにより取り決めがなされることが多い。そのため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、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。前述のように発破振動の予測は、振動速度に関するものはしばしば行われているが、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要因である爆源からの距離と薬量の他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の秒時間隔の影響をも考慮して行うことは発破計画の作成のみならず実施工上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開発した。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

* 正会員 工修 山口大学助手 工学部建設工学科
(〒755/山口県宇部市常盤台)

** 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科
(同上)

*** 正会員 工博 山口大学助教授 工学部建設工学科
(同上)

**** 宇部興産(株)伊佐セメント工場採鉱部長
(〒750-22/山口県美祿市伊佐町伊佐)

発破の発破振動レベルを推定する式を提案した。

1. 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¹⁾。

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²⁾。

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

ここで、 A_0 は基準の振動加速度であり、 $A_0=10^{-5} \text{ m/s}^2$ である。また、 A は人体が振動を感じる感じ方 (人体感覚) に対して補正を行った加速度実効値であり、次式で与えられる。

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

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、図-1 に示すような周波数特性を有す²⁾。したがって、振動レベル計はこの周波数に対する補正のために図-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、振動規制に用いられるものは鉛直振動のみである。

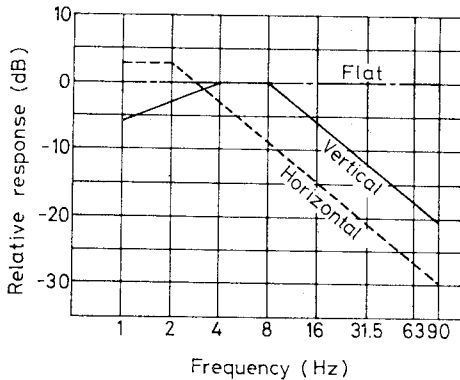


図-1 相対レスポンスと周波数との関係

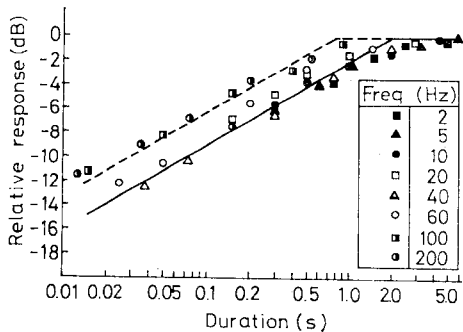


図-2 正弦振動の継続時間とレベル差との関係

一方、衝撃正弦振動 (ある時間間隔のみ正弦振動が継続する振動) の継続時間と人体が感じる振動の大きさとの間には、実験的に図-2 に示すような関係があるとされている²⁾。

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。図-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。

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。したがってこれらの値が必ずしも一致するとは言いがたく、さらに必ずしも人体感覚をも忠実に表わすものともいえない。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。

2. 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³⁾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。

(1) 振動感覚補正回路のシミュレーション

北村らは線形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。この方法によれば回路要素の計算式として炉波器、補正特性回路、整流器、指示計の4つからなる一連の差分方程式により振動レベル計をシミュレートすることが可能である。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のみを用い、指示特性回路については別途佐々⁴⁾によって提案されたものを改良して用いることとした。まず、北村らによって提案されている炉波器回路、振動感覚補正回路の差分方程式を示すと以下の通りである。

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 12 dB/oct の遮断特性を設けていることに対して次式を用いる。

$$y_n = (1 - 2e^{-adt} \cos(adt) + e^{-2adt}) \cdot x_{n-1} + 2e^{-adt} \cos(adt) y_{n-1} - e^{-2adt} y_{n-2} \dots \dots \dots (3)$$

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時系列、また $a=400.3345$ である。

b) 振動感覚補正回路：図-1 の周波数に対する相対レスポンスを次式で表わす。

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

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。北村ら⁴⁾の検討によれば上式の特性は JIS 規格に規定された各周波数に対する許容値を満足している。

(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計器で、目盛を対数目盛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わすために、佐々⁵⁾が数値シミュレーション回路として示した線形回路にダイオードを加えて非線形回路とし、振動レベル計の特性を忠実に再現するために立ち上りと立ち下がりとで異なった特性を持ちうるようにしたものが図-3 である。

図-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⁶⁾。

a) 立ち上がり特性 ($V_s \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \geq V_{co}$)

$$V_{cn} = (V_s \cdot R_2 / (R_1 + R_2) - V_{co}) \cdot (1 - e^{-dt/\tau_1}) + V_{co} \dots \dots \dots (5)$$

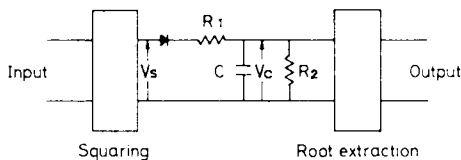


図-3 振動レベル計の指示部の動特性のシミュレーションのための電気回路

ここで、 V_{cn} は現時間ステップのコンデンサー電圧 V_{co} は前時間ステップのコンデンサー電圧 τ_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、 dt は時間間隔

b) 立ち下がり特性 ($V_s \cdot R_2 / (R_1 + R_2) < V_{co}$)

i) $V_s \geq V_{co}$

$$V_{cn} = (V_{co} - V_s \cdot R_2 / (R_1 + R_2)) e^{-dt/\tau_1} + V_s \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \dots \dots \dots (6)$$

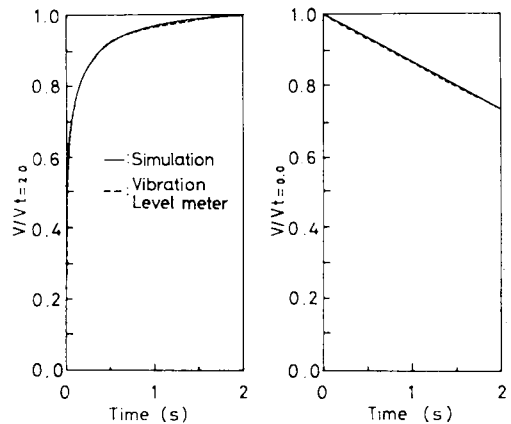
ii) $V_s < V_{co}$

$$V_{cn} = V_{co} e^{-dt/\tau_2} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 τ_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)を用いて検討を行った結果、 $C=100 \mu F, R_1=30 k\Omega, R_2=9.3 k\Omega$ を得た。以下の解析ではこれらの値を使用した。

図-4 a) は前記振動レベル計に周波数 50 Hz 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、b) は 50 Hz の正弦波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。ここで、図の縦軸 0.0-1.0 は 0-35 dB に対応し、これは振動レベル計の可動範囲に相当する。ちなみに 1~2 秒の間における振動レベルの差はたかだか 0.1 dB 程度で極めて小さい。



(a) 立ち上がり特性 (b) 立ち下がり特性

図-4 振動レベル計の指示部の動特性および数値シミュレーション特性

3. 発破振動レベルの推定式

(1) 振動レベルの推定式

従来の発破振動の推定式は、主として最大速度振幅 (PPV) をその対象としており、推定式としては一般的に次式のように書き表されることが多い⁷⁾。

$$PPV = KW^\alpha D^{-\beta} \dots\dots\dots (8)$$

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 は雷管の段当たりの総装薬量 (kg)、 D は爆源からの距離 (m) である。 α の値は通常 0.5~1.0 の範囲であり、 β の値は 2.0 前後の値をとる場合が多いようである。

いま、この式をもとに発破振動レベルの推定が次のように行われる。すなわち、最大速度振幅と振動レベルとの間には入力を連続正弦波とした場合、8 Hz 以上では理論的に次式が成立する。

$$VL = 20 \log_{10}(PPV) + 91 \dots\dots\dots (9)$$

このことから、上式に式 (8) を代入して振動レベルの推定式として

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

が得られる。

しかし、式 (9) は振動が連続正弦振動であるという前提に立っており、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、発破振動が問題とされるような場合には必ず段発発破が行われるが、この式では段発発破に対する配慮が全く含まれていない。このことから、より合理的な発破振動レベルの推定が必要と考えられる。

通常行われる段発発破において、隣接孔の発破による孔周辺の破壊の影響が各段で同一であると仮定する。そのとき発破振動の加速度波形は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、単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なる。実施工においては反射波の影響等により必ずしもこの仮定が満足されないことも考えられるが、ここでは現象を単純化して上記の仮定を設けた。

そのとき、後述の図-6 に見られるように後段の発破による振動レベルは前段までの振動レベルの影響を受ける。したがって、段発発破の振動レベル (VLd) は秒時差の効果を含めて次のように考えることができる。

$$VLd = VLs + \Delta VL \dots\dots\dots (11)$$

ここで、VLs は単発発破の振動レベル、 ΔVL は段発発破を行うことによる振動レベルの増加を表す。

先に筆者らは ΔVL についての推定方法を提案⁸⁾した

が、本研究では VLs についても振動継続時間を考慮して検討を加えるとともに、先の方法とは若干異なる考え方に立って ΔVL についても検討を行い段発発破の振動レベルの推定式を提案するものである。

(2) 単発発破の振動レベル (VLs) の推定

簡単のため単発発破による加速度波形を継続時間 T_d (ms) の正弦波形と仮定する。そのときの、衝撃的な正弦波形を人体が感じる振動の大きさと振動の継続時間との関係は前述のように図-2 に示される。振動レベル計はこの特性を表わすように作られたものであるから、連続正弦波に対する振動レベルと比べて継続時間 T_d の正弦波に対する振動レベルの低下量 (相対レスポンス) は

$$\text{相対レスポンス} = 10 \log_{10}(1 - e^{-T_d/1000/\tau}) \dots\dots (12)$$

となる。ただし、ここで τ は振動レベル計の時定数である。

このことから、単発発破の振動波形を継続時間 T_d で 8 Hz 以上の正弦波形とした場合、その振動レベル (VLs) は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} VLs &= 20 \log_{10}(PPV) + 91 + (\text{相対レスポンス}) \\ &= 20 \log_{10}(PPV) + 91 \\ &\quad + 10 \log_{10}(1 - e^{-T_d/1000/\tau}) \dots\dots\dots (13) \end{aligned}$$

単発発破の発破振動の継続時間は地質条件等によりばらつくことが考えられる。ここで、後述の図-8 を参考にして、いま仮に T_d に 100 ms を用い、時定数として振動レベル計の時定数 0.6 を用いると相対レスポンスは -8.3 dB となり振動レベルの推定式は

$$VLs = 20 \log_{10}(PPV) + 82.7 \dots\dots\dots (14)$$

となる。ここに、PPV の推定は式 (8) に従うものとする。

発破振動の周波数成分の多くは数 10 Hz 以上である。一方、振動レベル計の振動感覚補正特性は 1 Hz~90 Hz 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。このことから発破振動の周波数帯域を 8 Hz~90 Hz の範囲に限って検討を行っても特に問題はないであろう。また、発破による波形はたとえば後に示す図-8 のように正弦波形ではない。これは種々の要因により変化するものであるからこれを推定することは現時点では不可能である。そこで、ここでは単発発破の波形を正弦波形と仮定したわけであるが、これは振動レベルをやや大きめに評価することになる。しかしながら、これは振動レベルを安全側に評価していることになる。

(3) 段発発破による振動レベルの増加

前述のように単発発破の振動レベルは最大速度振幅の推定式 $PPV = KW^\alpha D^{-\beta}$ を用いて推定することがある

程度可能となる。次に本項では段発発破の秒時差による振動レベルの変化について検討を行う。特に、ここでは段発発破の秒時差 T_i (ms) は単発発破による振動継続時間 T_d より大きくそれぞれの単発発破の波形は重ならないものとする。

まず、現象を単純化するために、前と同様に単発発破により生じる加速度波形の代わりに衝撃正弦波形を用いて、段発発破の加速度波形を間欠正弦波形（これは衝撃正弦波形をつなぎ合わせたものである）で表わすこととした。すなわち、秒時差一定で、無限に同一の単発発破が繰り返されるものと段発発破を仮定した。この波形を用いて、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以下検討を行った。

図-5 は間欠正弦波形を示したものである。前述のように図中の T_d は衝撃正弦波形の継続時間、 T_i は段発発破の秒時差を表わしている。発破振動により観測される加速度波形には多くの周波数成分が含まれ、継続時間も一定ではない。そこで、ここでは周波数に関しては 20, 50, 80 Hz の 3 種類を、継続時間に関して波数を変化させることによりこれを 20 ms から 150 ms まで変化させて種々の波を衝撃正弦波形として用いることとし

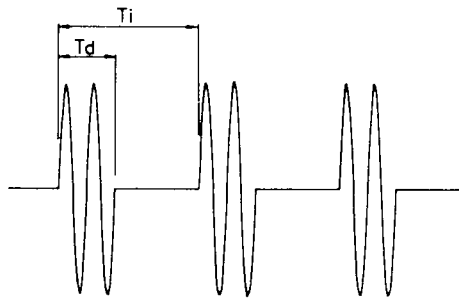


図-5 間欠正弦波形

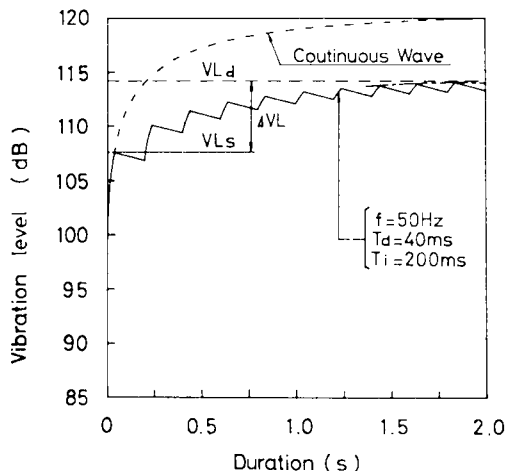


図-6 間欠正弦波形入力に対する振動レベルシミュレーション結果

た。これらの間欠正弦波形に対して、秒時差 T_i と継続時間 T_d をパラメータとして、振動レベルの変化を調べた。

図-6 の実線は間欠正弦波形入力 ($T_i=200$ ms, $T_d=40$ ms, 周波数 50 Hz, 振幅は実効値で 1000 gal) に対する振動レベル出力結果を示したものである。図中の破線は連続正弦振動波形入力に対する出力結果であり、2 秒後ではほぼ 120 dB に達していることがわかる。間欠正弦波形に対して振動レベルは T_d 区間で上昇、(T_i-T_d) 区間で下降を繰り返しながらある一定値となる。図-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。また、最初の衝撃正弦波形の入力に対する振動レベルの値は単発発破の振動レベル (VLs) を表わし、段発発破によるレベルの増加は図中の ΔVL で表わされる。

図-7 は縦軸に衝撃正弦波形の振動レベルを規準として、間欠正弦波形の振動レベルの増加（以下レベルの増加と称する）を、横軸に間欠正弦波形の秒時差をとりプロットした結果である。

図-7 の結果に対してレベルの増加の推定式を $m \log (n/T_i)$ の形で表わし、曲線近似を行った。その結果、 $n=1400$ としたときの回帰式 (15) が最もよく一致した。すなわち、

$$\Delta VL = 8.0 \log_{10}(1400/T_i) \dots\dots\dots (15)$$

式 (15) において $T_i < 1400$ ms であり、 $T_i \geq 1400$ ms では振動レベルはほぼ単発発破のそれに一致するものとする。

以上のようにして間欠正弦波形に対する振動レベルの増加量の推定は可能になった。しかし、実振動波形に対

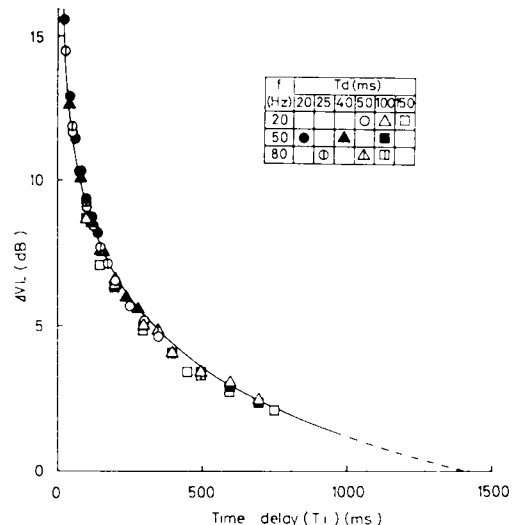
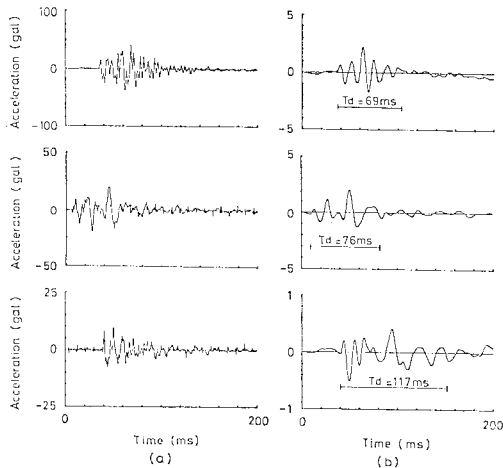


図-7 間欠正弦波形に対するレベルの増加と秒時差との関係

してはその周波数特性、波形の包絡線の形状、継続時間の影響等の評価についても考慮しなければならない。そこで、石灰石岩盤上で記録した単発発破の加速度波形⁹⁾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質量 1 kg の発破による発破振動を爆源から 100, 150, 200 m 離れた地点で観測したものである。

■ 単発発破の実振動波形 (以下単発実波形) は衝撃正弦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*¹⁰⁾ により提案された次式を用いて継続時間を決定した。



(a) 実振動加速度波形 (単発実波形) (b) 振動感覚補正を行った後の加速度波形

図-8 実振動加速度波形 (単発実波形) と算出された継続時間との関係

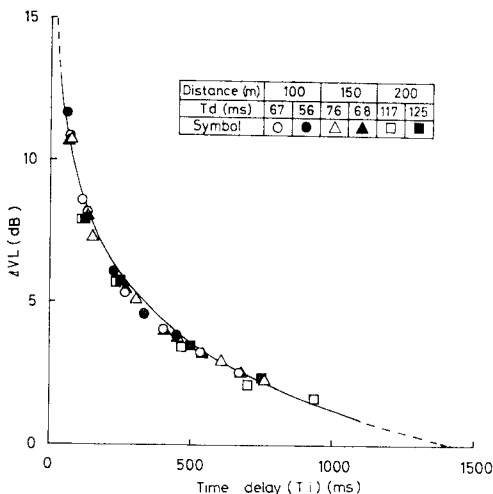


図-9 モデル段発波形に対するレベルの増加と秒時差との関係

$$T_d = (2.74)^2 I_0 / (A_{max})^2 \times 1000 \dots \dots \dots (16)$$

ここで、 T_d は継続時間 (ms), I_0 は加速度強度 (cm^2/s^3), A_{max} は加速度の最大値 (cm/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。

$$I_0 = \int_{-\infty}^{\infty} A^2(t) dt \dots \dots \dots (17)$$

上式は地震波の継続時間が近似的に (I_0/A_{max}^2) に比例するという関係より統計的に求められた式である。

図-8 に振動感覚補正を行う前および行った後の単発実波形の一例を示す。後者に対しては式 (16) より得られた継続時間も併せて示している。この単発実波形を適当な秒時差 ($T_i \geq T_d$) でつなぎ合わせて作ったモデル段発波形の振動レベルを求め、これらの単発実波形による振動レベルからの増加 ΔVL を示したものが 図-9 である。図中の実線はモデル波形に対して得られたレベルの増加の推定式 (15) によるものであるが、実線とプロットとの間には極めて良い一致が認められる。すなわち、これは、ここで提案した推定式が種々の周波数成分を含むランダム波形である実波形に対しても十分に成り立つことを示しているといえよう。

(4) 段発発破に対する振動レベルの推定式

前述のようにして単発発破の振動レベルと段発発破によるレベルの増加の推定が可能となった結果、段発発破の振動レベルは式 (11) に式 (13) と式 (15) を代入することにより

$$VLd = 20 \log_{10}(PPV) + 91 + 10 \log_{10}(1 - e^{-T_d/1000/\tau}) + 8.0 \log_{10}(1400/T_i) \dots \dots \dots (18)$$

で表わされる。

ここで、単発発破振動の継続時間の推定が困難な場合には例えば $T_d = 100 \text{ ms}$ と仮定すれば式 (18) は式 (14) より次のようになる。

$$VLd = 20 \log_{10}(PPV) + 82.7 + 8.0 \log_{10}(1400/T_i) \dots \dots \dots (19)$$

また、試験発破が可能で単発発破の振動レベルを実測できる場合には段発発破の振動レベルは次のように表わされる。

$$VLd = VLs + 8.0 \log_{10}(1400/T_i) \dots \dots \dots (20)$$

この結果、振動レベルの推定はより精度の高いものとなる。

結 論

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。そこでまず振動レベル計の特性を明らかにすると同時に、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作成した。続いて段発発破による振動を単発発破が等間隔で無限に続くものと仮定し、段発発破の振動レベルを単発発破の振動レベルと段発発破を行うことによる振動レベルの増加に分けてそれぞれ検討を行い、それらの和が段発発破の振動レベルであると考えた。その結果、シミュレーション解析により段発発破の発破振動レベル (VLd) の推定式として次式を得た。

$$VLd = 20 \log_{10}(PPV) + 91 + 10 \log_{10}(1 - e^{-T_d/1000/\tau}) + 8.0 \log_{10}(1400/T_i) \dots\dots\dots i)$$

$$VLd = VLs + 8.0 \log_{10}(1400/T_i) \dots\dots\dots ii)$$

ここに、 T_d (ms) は 加速度振動波形の継続時間、 T_i (ms) は段発発破の秒時差、 τ は振動レベル計の時定数 ($\tau=0.6$) である。

i) 式は なんらかの方法で波形の継続時間の予測が可能な場合に使用する式であり、ii) 式は試験発破が可能で単発発破の振動レベルを実測できる場合に使用する式である。

なお、本研究で開発された計算機プログラムは計量法検定合格品である振動レベル計の指示値に従って作られている。また、振動レベル計の動特性は必ずしも 図—2 を忠実に再現するものでないことはよく知られているところである。そのため、今後の振動レベル計の改良によって本研究の推定式に用いられた数値の若干の変更が必要となることも予想される。

また、本研究では段発発破の秒時差 T_i が振動の継続時間 T_d より大きいものとして扱っている。しかし実施工においては $T_i < T_d$ として波形が重なる場合もしばしば生じる。この点については今後の課題としたい。

謝 辞：本研究の遂行にあたり、宇部興産(株)伊佐セメント工場、秋山剛二・原田晋作両氏はじめ、採鉱第一課の諸氏には多大な協力を頂いた。また、振動レベル計のシミュレーションプログラムの作成にあたり、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わす次第である。

参 考 文 献

- 1) 日本規格協会：日本工業規格 振動レベル測定方法，JIS Z 8735.
- 2) 日本規格協会：日本工業規格 振動レベル計，JIS C 1510.
- 3) 北村泰寿・桜井春輔・繁純章吾：発破振動における振動速度と振動レベルの対応について，第39回土木学会年次学術講演会概要集，第Ⅲ部門，pp. 885~886，1984年.
- 4) 北村泰寿・繁純章吾：振動レベル波形のデジタルシミュレーション(その2)，土木学会関西支部年次学術講演会講演集，I，1984年.
- 5) 佐々宏一：振動レベルとその予測について，物理探鉱，第34巻，第6号，pp. 16~23，1981年.
- 6) 国松直・中川浩二・三浦房紀：発破振動レベルの予測に関する一考察，第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 116~119，1985年.
- 7) たとえば，工業火薬協会編：発破ハンドブック，山海堂，1976年.
- 8) 国松直・中川浩二・三浦房紀・今村威：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，工業火薬協会誌，投稿中.
- 9) 国松直・中川浩二・三浦房紀・中満光広：振動レベルからみた発破振動に関する考察，山口大学工学部研究報告，第35巻，第1号，pp. 121~127，1984年.
- 10) Vanmarcke, E.H. and Lai, S.P.: Strong-motion duration and rms amplitude of earthquake records, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 70, No. 4, pp. 1293~1307, 1980.

(1985.6.21・受付)

●土木学会新刊案内●

土木技術者のための振動便覧

A 5判 570 ページ 活版印刷・上製布装ビニールケース入り 10 000 円 会員特価 8 500 円 (千とも)

第1章 振動理論 第2章 スペクトル解析と不規則振動 第3章 地盤の振動ならびに波動 第4章 構造物の振動 第5章 流体系の振動 第6章 振動測定とデータ解析 第7章 振動に関する数値解析 第8章 土と材料の動的性質 第9章 地震による振動 第10章 風による振動 第11章 水による振動 第12章 環境と振動，騒音 第13章 衝撃的現象 第14章 振動の利用 ●付録 耐震規定 振動・騒音の参考資料 索引

●本書の申込書は学会誌 12 月号巻末にとじ込んでありますのでご利用下さい●