

速度波形を用いた振動レベルの推定

ESTIMATION OF THE VIBRATION LEVEL FROM IMPULSIVE VELOCITY WAVES

国松 直*・三浦房紀**・今村 威***・中川浩二****
By Sunao KUNIMATSU, Fusanori MIURA, Takeshi IMAMURA
and Koji NAKAGAWA

There are two approaches for the estimation of the blasting vibration, which are based on the peak particle velocity (*PPV*) and vibration level (*VL*). The relationships between the *PPV* and the *VL* have been investigated but there are still areas to be investigated. This study aims to establish the relationship between the two, and to propose a predictor for the *VL* from the *PPV* of impulsive waves. Although the *VL* is defined by using the root-mean-square of the accelerogram which is filtered through the response characteristics of human body, the *VL* was obtained from velocity wave instead of from the filtered accelerogram in this study. The proposed predictor is a function of two variables, which are the *PPV* and the duration time of the velocity wave. It was found that the predictor is useful for practical purposes.

Keywords : blasting vibration, peak particle velocity, vibration level, predictor

1. 緒 言

発破振動の強さを評価するに際しては、最大速度振幅による考え方と振動レベルによる考え方の2つがあることはよく知られているところである。すなわち、前者は発破振動により構造物等が被害を受ける程度が発破振動の最大速度振幅とよい相関を有することから、古くから用いられている評価基準であり、カイン (kine : cm/s) を単位としている。これに対して、後者は構造物等ではなく人間が振動をどのように感じるかという立場から、振動に対する人体の感じる程度を評価するために導入された量であり、デシベル (dB) を単位としている。

住宅地等の近傍で発破作業を行う場合には、通常そこに居住する住民の承諾を必要とする。この場合、住民立会いのもとに試験発破を行い、それを参考にして発破の承諾を得、以後発破ごとに振動を計測し、管理しながら作業を進めていくことになる。この場合の管理値としては、最大速度振幅か振動レベルかが用いられることにな

るが、現在のところ前者が用いられることが多いようである。すなわち、発破工事においては発破ごとに振動速度波形を電磁オシログラフ等で記録し、波形から最大速度振幅を読み取りながら次回の発破を行うことが通常行われる。

一方、振動レベルを規制値として考える場合には、振動レベル計およびレベルレコーダーを用いて振動レベルの計測を行い、それによって発破作業を管理していくことになる。しかし、最近では管理値として振動速度のみならず、振動レベルに対する配慮もあわせて行わなければならぬ場合もしばしばみられる。そこで、毎回の発破に対して記録される振動速度波形から振動レベルを正確、かつ簡単に求めることができれば、発破振動を振動速度のみならず振動レベルの立場からも管理するうえで好都合である。

振動速度から振動レベルを推定する場合には、次式で与えられる変換式（周波数 8 Hz 以上の単一正弦振動に対して成立する理論的な関係式）¹⁾

$$VL = 20 \cdot \log_{10}(PPV) + 91 \text{ (dB)} \quad \dots \dots \dots \quad (1)$$

を用いることがよく行われるようである(ここに, VL は振動レベル, PPV は最大速度振幅). しかし, この式は周知のごとく速度波形が PPV を振幅とする連続正弦波形(継続時間無限大)である場合に対応するもので

* 正会員 工修 山口大学助手 工学部建設工学科
(〒755 山口県宇部市當賀台 2557)

** 正会員 工博 山口大学助教授 工学部建設工学科（同上）

*** 正会員 上博 山口大学助教授 工学部建設
*** 宇部興産(株) セメント事業本部・鉱業部長
(〒755 山口県宇部市西本町 1-12-32)

***** 正会員 丁博 山口大学教授 工学部建設工学科

あり、発破振動波形のように継続時間のきわめて短い衝撃的な振動波形に対しては、明らかに振動レベルを過大評価することになる。すなわち、式(1)は発破振動に関する限り速度波形から振動レベルを推定するには問題があるといえる。

以上のことから、本研究では振動レベルの定義に基づいて、電磁オシログラフ等で記録された振動速度波形から読み取られる最大速度振幅と波形継続時間を用いて振動レベルを簡単に精度よく推定する方法について論じる。

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)²⁾には JIS C 1510(振動レベル計)³⁾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。

ここに, 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 は人体感觉補正を行った後の加速度実効値であり, 次式で与えられる.

ここに, A_n は周波数 f_n (Hz) 成分の加速度実効値であり, c_n は f_n に対する補正值(相対レスポンス)を表わす. 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る. したがって, JIS Z 8735 には, 振動レベル計は図-1 に示す周波数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こと, と規定されている.

次に、衝撃正弦振動（非常に短い継続時間有する正弦振動）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図-2に示すような関係があるとされている¹⁾。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

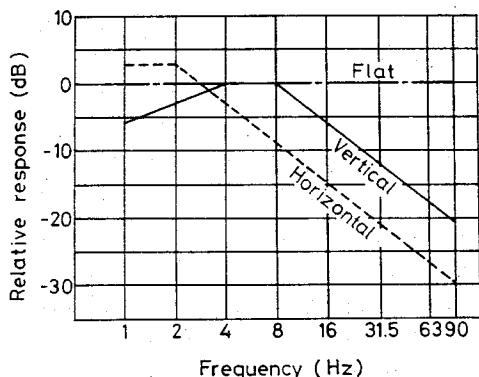


図-1 相対レスポンスと周波数の関係

数が 0.63 秒に相当する特性をもつように規定されている。ちなみに、図-2において、時定数 0.63 秒に相当する指示特性は破線（比較的高周波数成分）と実線（比較的低周波数成分）のほぼ中間のレスポンスをもつことになるようである。

以上のように、振動レベル計においてはピックアップで計測された加速度波形の入力に対して、まず人体感覚補正回路を通じて周波数補正が行われ、次に指示特性回路を通じて継続時間に対する補正が行われる。

前報⁴⁾で報告したように、著者らは振動レベルが鉛直振動に対して規制されていることから、鉛直方向の人体感覚補正回路と指示特性回路をシミュレートした振動レベル計のシミュレーションプログラムを開発している。以下の本研究における振動レベルの算定は、すべてこのプログラムの全体あるいは一部を用いたものである。

3. 速度波形による振動レベルの評価の考え方

電磁オシログラフなどにより記録紙上に記録された速度波形の最大振幅と継続時間をもとに、振動レベルを評価する手法の基本的な考え方と、その問題点とを述べると以下のようになる。

いま、図-3(a)に実測された加速度波形の一例を示し、これを $a(t)$ と表わす。 $a(t)$ に図-1で与えられる人体感覚補正を加えたものが図-3(b)であり、これを $a'(t)$ とする。

この代わりに、図-3(a)を積分して得られた速度波形 $v(t)$ を図-3(c)に示す。図にみられるように図-3(b)と図-3(c)はよく似た波形となる。この波形の類似性は振動レベルを求めるのに加速度波形の代わりに速度波形を用い得ることを示唆するものである。

ここで、図-3(c)に示した $v(t)$ の継続時間 (T_d) と等しい継続時間 ($v(t)$ の継続時間については後述する) を有し、振幅が v_0 (PPV に等しい) の衝撃正弦波形を図-3(d) に示す。さらに、図-3(d) の衝撃正弦波形が無限に続くとした場合の連続正弦波形を図-3(e) とすれば図-3(e) に対応する振動レベルは式(1)

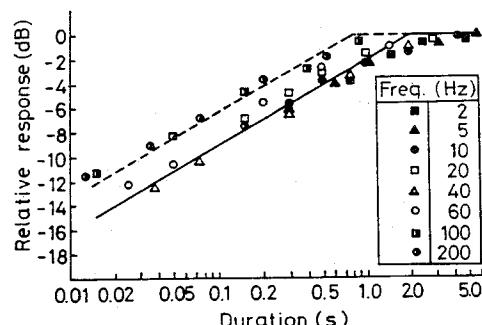


図-2 正弦振動の継続時間とレベル差の関係

より

$$VL = 20 \cdot \log_{10}(v_0) + 91 \quad \dots \dots \dots \quad (4)$$

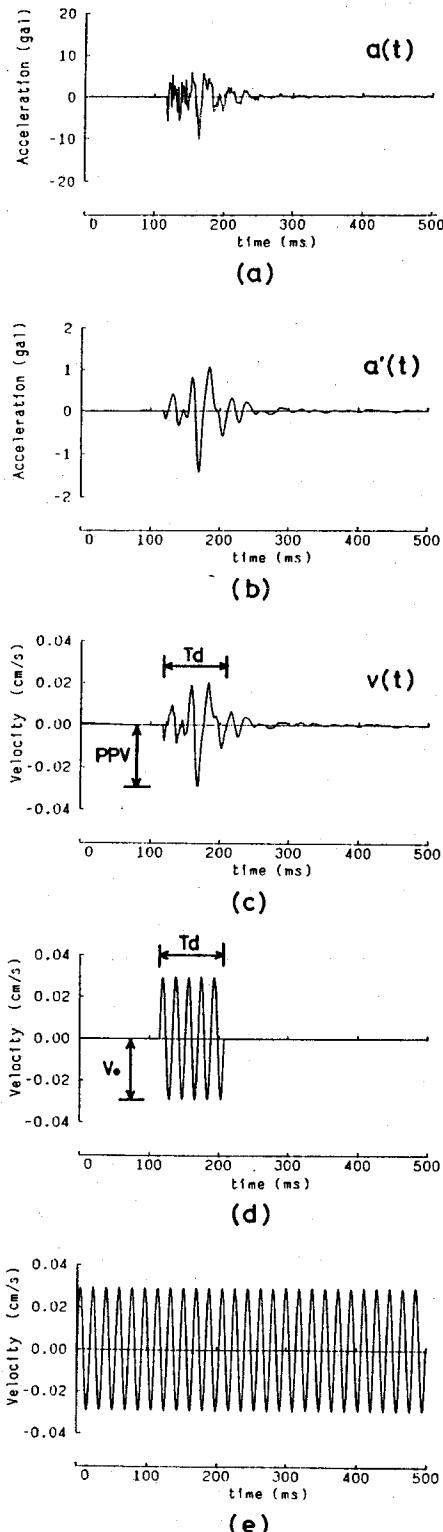


図-3 本研究で提案する手法の考え方の説明図

で与えられる。それに対し、図-3(d)の衝撃正弦波形に対する振動レベルは、前報で述べたように振動レベル計のもつ相対レスポンス特性から、 T_d を継続時間とするとき

$$VL = 20 \cdot \log_{10}(v_0) + 91 \\ + 10 \cdot \log_{10}(1 - e^{-T_d/0.63}) \quad \dots \dots \dots \quad (5)$$

として与えられることがわかっている⁴⁾。

そこで、本研究では式(5)に基づいて振動レベルを推定することを考えるが、速度波形を用いて振動レベルを推定するためには、次の3点について検討を行い、これらを式(5)に反映させる必要がある。

- 1) 人体感覺補正された加速度波形に代わって速度波形を用いることの問題点と、それにより生じる誤差の評価
 - 2) 速度波形の波形継続時間 T_d の算定
 - 3) 速度波形を指示特性回路に入力して得られる振動レベルと、それと同じ継続時間 T_d の衝撃正弦波形を指示特性回路に入力して得られる振動レベルとの差の評価

4. 振動速度波形からの振動レベルの推定

本章では 3. で述べた振動速度波形をもとに振動レベルを推定する場合の問題点の解決について述べる。

(1) 人体感覚補正された加速度波形と速度波形との比較

周波数 f の正弦振動を考えると、加速度実効値 A (cm/s^2) と速度実効値 v (cm/s) との間には

なる関係がある。したがって、振幅が同じで周波数の異なる2つの加速度波形を積分して速度波形を得る場合、一方の波の周波数が他方のそれの2倍、すなわち1octの差があれば、得られる速度波形の振幅は1/2になる。すなわち、振幅が1/2となることは振動レベルの定義式(2)から6dBの低下となるので、一般的に加速度波形を積分して速度波形を得るとき、-6dB/octの周波数特性を有することになる。

一方、図-1に示した人体感覚補正のための相対レスポンスは 8 Hz~90 Hz の間において -6 dB/oct を示す。これは先の加速度波形から速度波形への積分と同じ関係にある（図-4 参照）。このことは、計測される発破振動の周波数成分が 8 Hz~90 Hz の間にのみあれば、速度波形と人体感覚補正された加速度波形とは相似形を示し、人体感覚補正された加速度波形の代わりに速度波形を指示特性回路に入力して振動レベルを求めても問題はないことを意味する。しかし、人体感覚補正のための相対レスポンスは 図-1 のように 8 Hz 以下では -6

dB/oct とは異なった周波数特性を有する。また、90 Hz 以上の周波数に対しては振動レベル計は -12 dB/oct なる周波数特性を有するフィルターを備えている。これにより、計測される振動波形が 8 Hz～90 Hz 以外の周波数成分を有する場合には、人体感覚補正された加速度波形と実際の速度波形との間には差が生じることになる。すなわち、速度波形より推定される振動レベルは誤差を含むことになる。この誤差は上述のとおり 8 Hz～90 Hz 以外の周波数成分によるわけであるが、この点について は 5. で検討する。

(2) 継続時間の評価

振動レベルの定義は式(2), (3)に示したように基本的には定常波に対してなされるものであるが、非定常な波に対しては周知のように振動の継続時間を考慮して、式(3)の代わりに加速度実効値を次式から算出することが可能である¹⁾。

$$A = \sqrt{\frac{1}{(t_2-t_1)} \int_{t_1}^{t_2} (a'(t))^2 dt} \quad (7)$$

ここに、 $a'(t)$ は人体感覚補正された加速度波形であり、 t_1, t_2 は振動計測の開始および終了の時刻である。ここで、継続時間をどのようにとるかは振幅が時間とともに急激に変化する衝撃振動の場合には大きな問題となり、式(7)で与えた実効値はこの継続時間のとり方によりかなり変化する。ちなみに、振動レベル計の場合には、人間の振動感覚が図-2 のように継続時間により変化し、1秒より短くなると鈍感になると対応させるため時定数を 0.63 としているが、これは結果的には継続時間をほぼ 1秒としたものに対応している。

振動波形が衝撃正弦波形であれば、その振幅、継続時間が明確に規定され、その振動レベルは式(5)のように与えられることがわかっている。しかし、一般の振動波形の場合には必ずしもその継続時間の評価は容易ではない。そこで、ここでは Vanmarcke and Lai⁵⁾ によって次式で与えられる継続時間の評価法を用いることにする。

$$T_d = (2.74)^2 \cdot I_{01} / (PPV)^2 \quad (\text{s}) \quad (8)$$

ここに、 I_{01} は速度強度であり次式で与えられる。

$$I_{01} = \int_{-\infty}^{\infty} v^2(t) dt \quad (9)$$

また、波動エネルギーの主要部分が継続時間 T_d の間にみるとみなせる場合には式(9)は

$$I_{01} = \int_0^{T_d} v^2(t) dt \quad (9')$$

とすることができる。

(3) 振動波形と振動レベル

ここで、図-3(d)に示すように継続時間 T_d をもち、振幅が PPV に等しい衝撃正弦波形を考える。この波形に対する速度強度 I_{02} は正弦波形の実効値が $PPV/\sqrt{2}$ であることから次式で与えられる。

$$I_{02} = \int_0^{T_d} (PPV/\sqrt{2})^2 dt = \frac{1}{2} \cdot (PPV)^2 \cdot T_d \quad (10)$$

いま、式(8)を变形すると

$$I_{01} = \frac{1}{(2.74)^2} \cdot (PPV)^2 \cdot T_d \quad (11)$$

であるから、式(10), (11)より I_{01}, I_{02} 両者の速度強度の比をとれば次のように一定値となる。

$$\frac{I_{01}}{I_{02}} = \frac{2}{(2.74)^2} = 0.266 \quad (12)$$

ここで、速度波形 $v(t)$ と、それと同じ継続時間を持つ衝撃正弦速度波形の実効値の比をとる。式(7)の実効値の定義を考慮に入れ、式(9'), (10)を用いると、この比は次式で与えられるように速度強度 I_{01} と I_{02} の比の平方根として表わされる。すなわち、

$$\begin{aligned} \text{実効値の比} &= \frac{\sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} v^2(t) dt}}{\sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} (PPV/\sqrt{2})^2 dt}} \\ &= \sqrt{I_{01}/I_{02}} \\ &= 0.516 \quad (\because \text{式(12)}) \end{aligned} \quad (13)$$

を得る。これら2つの波形の実効値の比が常に 0.516 であるということは、振動レベル定義式(2)にこの値を代入すると、両者の振動レベルの差は

$$AVL = 20 \cdot \log_{10}(0.516) \doteq -5.7 \text{ (dB)} \quad (14)$$

となることを意味する。すなわち、常に約 5.7 dB、衝撃正弦波形の方が一般の波形よりも大きく評価されることになる。換言すれば、人体感覚補正後の波形がどのような波形であっても、耐震工学や地震工学の分野でよく用いられる式(8)で与えられる T_d を用いれば、継続時間 T_d 、振幅がその波形の PPV に等しい衝撃正弦波形とのレベル差は常に約 6 dB となる。

(4) 衝撃的振動の振動レベル推定式

以上の議論より、速度波形を用いて衝撃的振動の振動レベルを推定するための手順は速度波形の継続時間を T_d 、その最大振幅を PPV とすると以下のように整理することができる(図-3 参照)。

a) まず、振幅 PPV で与えられる連続正弦振動速度波形に対して

$$VL = 20 \cdot \log_{10}(PPV) + 91 \quad (1)$$

b) 次に、この継続時間が T_d となれば、振動レベルは式(5)で与えられる。すなわち

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

$$+ 10 \cdot \log_{10}(1 - e^{-T_d/0.63}) \quad (5)$$

c) さらに、衝撃正弦波形とこれと同じ継続時間を持つ任意波形の振動レベルの差が 6 dB であることから

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

$$+ 10 \cdot \log_{10}(1 - e^{-T_d/0.63}) - 6$$

$$= 20 \cdot \log_{10}(PPV) + 10 \cdot \log_{10}(1 - e^{-T_d/0.63}) + 85 \quad \dots\dots\dots(15)$$

として任意形状を有する速度波形の振動レベルは与えられる。

5. 速度波形を用いた振動レベル推定式の妥当性の検討

(1) 8 Hz~90 Hz 以外の周波数成分とそれに伴う誤差

本研究で提案する、速度波形から振動レベルを推定する手法においては、前述したように図-1で与えられる人体感覚補正された加速度波形を速度波形で置き換えることから始まる。これらは、図-3の(b), (c)に示したようによく似た形状を示し、対応関係はよいと思われる。しかし、速度波形は加速度波形を図-4中の実線のように全周波数領域において -6 dB/oct をもって補正したものと相似な関係にあることから、8 Hz~90 Hz 以外の周波数成分に対して振動を大きく評価していることになる。そこで、加速度波形を積分した速度波形を指示特性回路に入れて算出した振動レベル (VL')^① と、本来の振動レベル計のシミュレーション回路により得られた振動レベル（加速度波形を人体感覚補正回路、指示特性回路の両回路を通して求めた振動レベル） VL との比較を行った（図-5 参照）。その結果を 図-6 に示す。

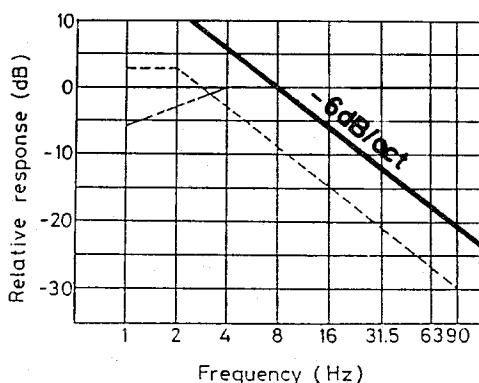


図-4 速度波形を用いたときの相対レスポンス

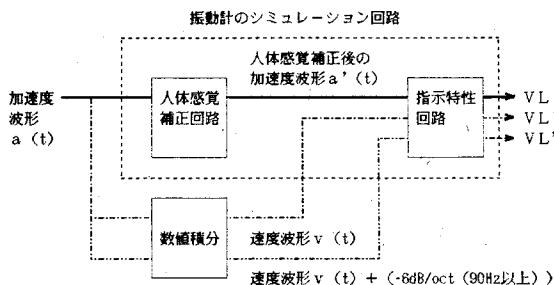


図-5 本研究で用いる振動レベル、 VL 、 VL' 、 VL'' の説明図

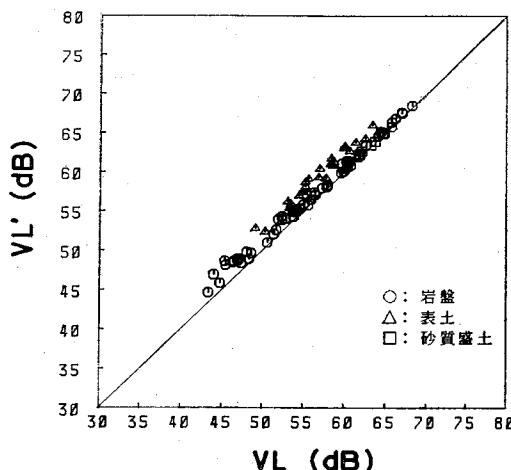


図-6 VL' と VL との関係

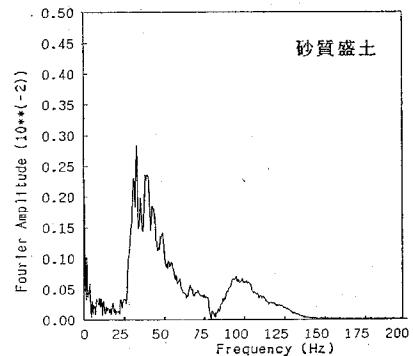
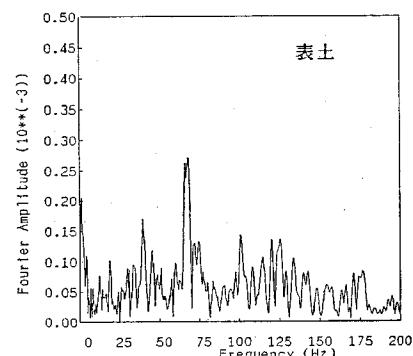
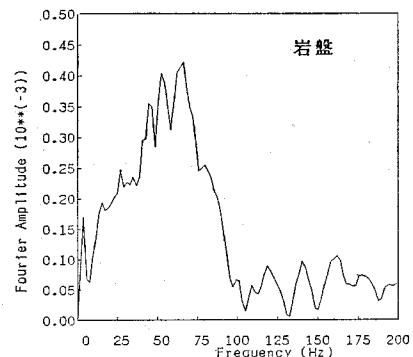


図-7 フーリエスペクトルの例

同図中の直線は VL と VL' とが等しい線であり○印は岩盤上、△印は表土上、□印は砂質盛土上で得られた振動に対するものである。これより、両者はほぼ等しい値となっているが、やや VL' の方が大きめの値となっており、特に表土層上のデータには 3 dB 程度大きくなるものがみられる。

ここで、岩盤、表土、盛土で得られた波形から任意に取り出した各 1 個の波形についてのフーリエスペクトルを図-7 に示す。これによると、卓越した周波数はかなり高いところにもあり、図-5 に示した VL と VL' との差は主として 90 Hz 以上の周波数によって生じるものと考えられる。そこで、先の VL' を求めた周波数補正回路（ここでは単に積分回路）の 90 Hz 以上の部分に振動レベル計と同じ -12 dB/oct の遮断特性をもたせて計算した振動レベル VL'' を示したものが図-8 である。これによると VL'' と VL はほぼ等しくなることがわかる。すなわち、人体感覚補正された加速度波形の代わりに速度波形を用いて振動レベルを求める場合の誤差は、ここで用いたデータに関するかぎり 90 Hz 以上の高周波数成分が問題となることがわかる。発破に伴う振動には高い周波数成分が多く含まれているので、この結果は一般的の発破振動に対してもそう妥当性を欠くものではないと思われる。

さらに、図-6 に用いた岩盤上、表土層上で得られた波形について周波数分析を行い、90 Hz 以上の各周波数成分のフーリエ振幅の絶対値の総和 ($\sum_{f=90 \sim 200} |Af|$) が 90 Hz 以下のそれ ($\sum_{f=0 \sim 90} |Af|$) に対する割合と、誤差 ($VL' - VL$) の関係を示したものが図-9 である。横軸は 90 Hz 以上とそれ以下のフーリエ振幅の和の比であるから、直接波動エネルギーの比とはならないがエネルギーの比に関係した量と考えることはできる。これによると、($VL' - VL$) の値にはばらつきはあるが、90 Hz

より高周波成分の割合が増加するに従って増加し、その値は最大 3.5 dB 程度であることがわかる。この図は高周波成分が多いと判断される波形の場合の誤差の見積りに利用することができよう。

(2) 継続時間の推定とそれに伴う誤差

本研究の目的は、電磁オシログラフ等で示された振動速度波形の最大振幅と継続時間とから振動レベルを簡便に推定することにある。最大振幅は客観的に定まるが、一方の継続時間は目視による判定に頼らざるを得ない。したがって、目視判定された継続時間が誤差を含むことにより生じる振動レベルの誤差を評価する必要がある。そこで、継続時間の判定誤差 (Vanmarcke and Lai の継続時間に対する目視判定された継続時間の誤差) が振動レベルにどの程度の誤差を生じるかを検討する。

地盤振動の継続時間を確定することは必ずしも容易なことではない。Vanmarcke and Lai の方法は適当な係数 2.74 を用いることにより、われわれが波形をみて「ほぼこの程度」と継続時間を判定したものと一致するようにしたものである。ここで、図-7 に用いた波形例を図-10 に示し、Vanmarcke and Lai の方法により得られた継続時間を同図中に矢印で示す。これらの図より、計算より求まった継続時間は目視による継続時間に對してほぼ妥当な値とみなすことができよう。

図-11 は多くの速度波形に対して式 (8) で算出された $T_d(T_{d,c})$ と目視による $T_d(T_{d,m})$ の差を示す。 $T_{d,m}$ の判定のコツとしては振動波形の主要動部の継続時間に着目すればよいようと思われる。両者の間には比較的よい一致がみられるようであるが、一部、2 倍近い差もみられる。

そこで、図-12 は与えられた PPV の値に対して先の式 (15) の衝撃正弦波形の継続時間と振動レベルとの関係を示したものである。図の破線からわかるように、たとえば $PPV = 0.1$ (cm/s) の速度波形で、継続時間 $T_d = 100$ ms (56.7 dB) のものを誤って $T_d = 200$ ms

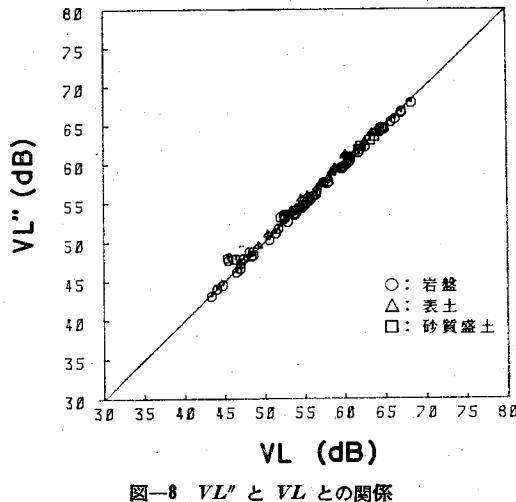


図-8 VL'' と VL との関係

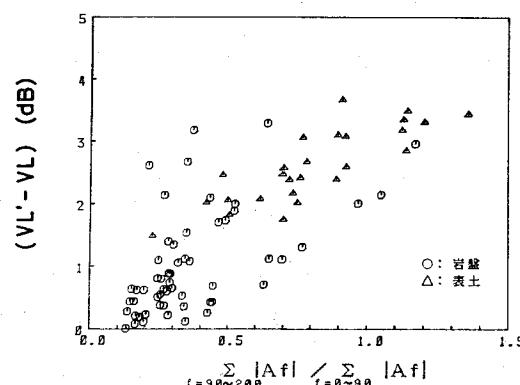


図-9 $(VL' - VL)$ と $\sum_{f=90 \sim 200} |Af| / \sum_{f=0 \sim 90} |Af|$ との関係

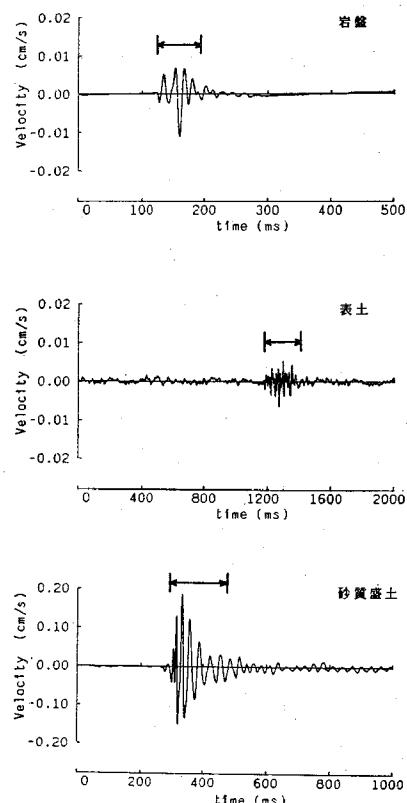
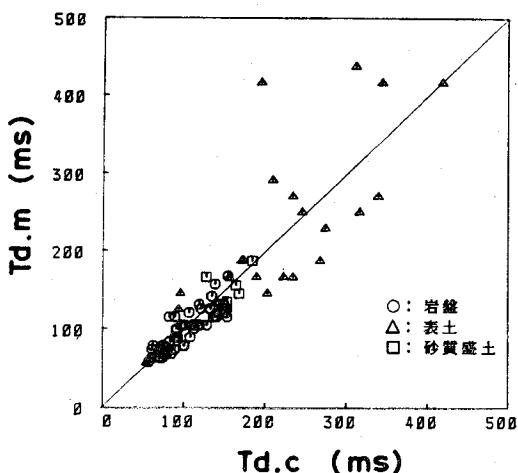
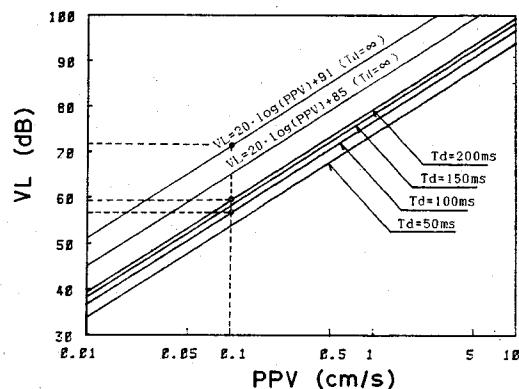
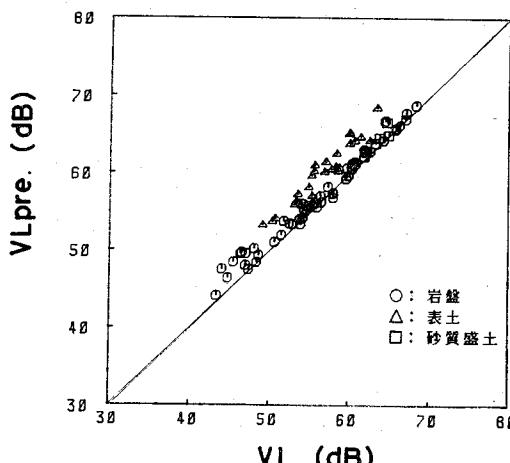


図-10 繼続時間算出例

図-11 $T_{d.m}$ と $T_{d.c}$ との関係

(59.3 dB) と読んだ場合、その誤差は 2.6 dB となる。一方、これを式(1)から求めると振動レベルは 71.0 dB となり誤差は 14.3 dB となる。すなわち、振動レベルを推定する際に継続時間の判定を少々誤ったとしても、それにより生じる振動レベルの推定誤差は、式(1)を用いた場合よりはるかに小さいといえる。

(3) 速度波形より推定された振動レベルの精度の

図-12 式(15)による VL と PPV との関係図-13 $VL_{pre.}$ と VL との関係

検討

速度記録の最大振幅 (PPV) と目視による継続時間 (T_d) を用いて式(15)から推定された振動レベルの精度を検討する。

加速度記録を積分して得られた速度波形から読み取った PPV と $T_{d.m}$ から、これらを式(15)に代入して得られた振動レベル ($VL_{pre.}$) と、加速度記録を直接シミュレーション計算により求めた振動レベル VL とを比較し、それを図-13に示す。

これより、 $VL_{pre.}$ は VL よりやや大きめに評価され、その間には最大 5 dB 程度の差がみられるものもあるが、全体的には安全側で両者はほぼ等しい値を示しており、 $VL_{pre.}$ は VL の推定値として十分に有用であるといえよう。

6. 結論

本研究は発破振動の評価に対して用いられている最大速度振幅と振動レベルの 2 つの関係を明確にし、最大速度振幅から振動レベルを算出する方法を提案したもので

ある。その際、誤差を生じる要因を明らかにするとともに、その誤差が振動レベルに与える影響についても言及した。その結果、速度波形から振動レベルを算出することの妥当性が得られた。

従来、しばしば使用してきた最大速度振幅から振動レベルを算出する式(1)に対して、本研究で提案した式(15)はその推定精度において格段の向上を与える。したがって、実施工における発破振動管理においても基本的に式(15)を用いれば、最大速度振幅を管理しながら振動レベルをも管理することが可能と思われる。これは、実施工における発破管理に対して非常に有効なことであると考えられる。

参考文献

- 1) たとえば、公害防止の技術と法規編集委員会編：公害防止の技術と法規・振動編、産業公害防止協会、1985。
- 2) 日本規格協会：日本工業規格 振動レベル測定方法、JIS Z 8735。
- 3) 日本規格協会：日本工業規格 振動レベル計、JIS C 1510。
- 4) 国松 直・中川浩二・三浦房紀・今村 威：発破振動における振動レベルの推定、土木学会論文集、第367号／VI-4, pp. 45~51, 1986.
- 5) 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.
- 6) 国松 直・中川浩二・三浦房紀・今村 威：速度波形を用いた発破振動レベルの算出について、第41回土木学会年次学術講演会概要集、第6部門、pp. 79~80, 1986.

(1987.10.9・受付)