

(31) 速度波形から算出した振動レベルの評価

山口大学工学部 正 国松 直 山口大学工学部 正 三浦房紀
 宇部興産(株) 今村 威 山口大学工学部 正○中川浩二

1. はじめに 発破振動の強さを評価するに際しては、最大速度振幅(カイン(kine:cm/s))による考え方と振動レベル(デシベル(dB))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。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8Hz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⁾

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

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は最大速度振幅である。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あり、発破振動波形のように継続時間の極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、上式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。

2. 振動レベルおよび振動レベル計 JIS C 1510 では振動レベル(VL)を次のように定義している。

$$VL=20\cdot\log_{10}(A/A_0) \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

として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 は人体感覚補正を行なった後の加速度実効値であり、次式で与えられる。

$$A=[\sum A_n^2 \cdot 10^{c_n/10}]^{1/2} \quad (3)$$

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。

次に、衝撃正弦振動(非常に短い継続時間を有する正弦振動)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数が0.63秒に相当する特性を持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持つことになるようである。

筆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²⁾。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 $a(t)$ と表す。 $a(t)$ に図1で与えられる人体感覚補正を加えたもの

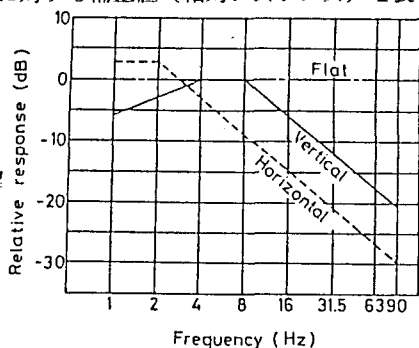


図-1 相対レスポンスと周波数の関係

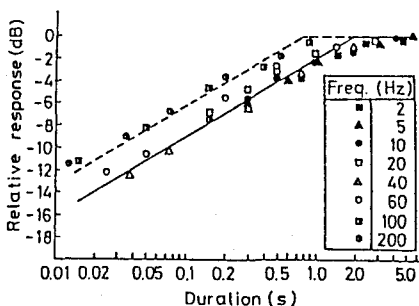


図-2 正弦振動の継続時間とレベル差の関係

が図3(b)であり、これを $a'(t)$ とする。

これに対し、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。図に見られるように図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)より

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

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、振動レベル計の持つ相対レスポンス特性から、 T_d を継続時間とすると

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

として与えられることがわかっている²⁾。

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) 人体感覚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 ここでは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 $A(\text{cm/s}^2)$ と速度実効値 $v(\text{cm/s})$ の間には $v = (1/2\pi f) A$ なる関係がある。従って、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の2倍、すなわち1 oct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-6dB/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。このことは、計測され

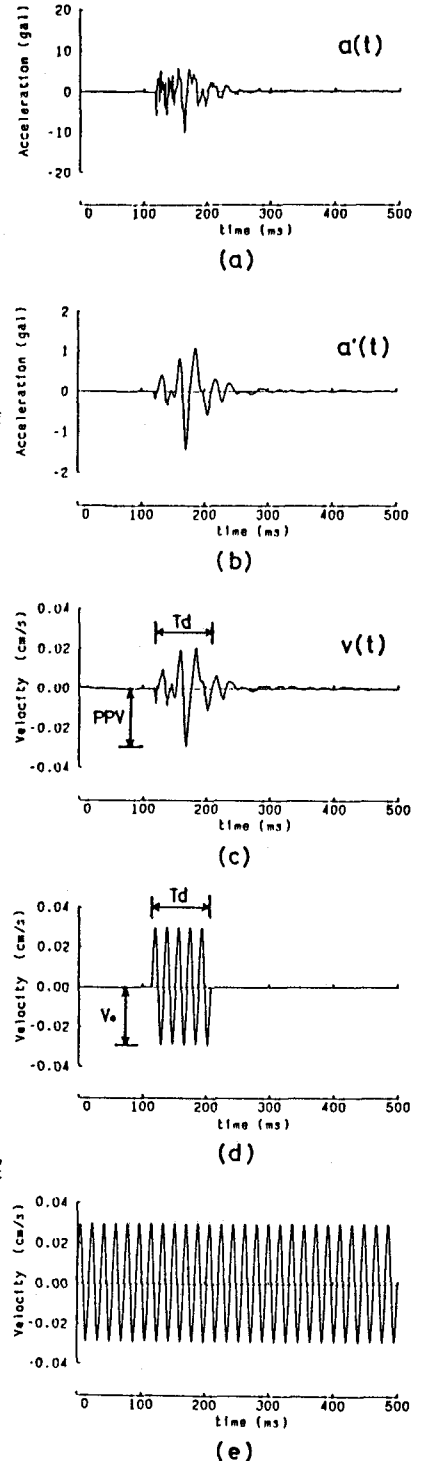


図-3 本研究で提案する手法の考え方の説明図

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の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。

(2) 継続時間の評価 振動レベルの定義は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⁾。

$$A = \sqrt{\frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} (a'(t))^2 dt} \quad (6)$$

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に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(6)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こと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秒としたものになる。

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(2)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 Lai³⁾によって次式で与えられる継続時間の算出法を用いることにする。

$$T_d = (2.74)^2 \cdot I_{01} / (PPV)^2 \quad (s) \quad (7)$$

ここに、 I_{01} は速度強度であり次式で与えられる。

$$I_{01} = \int_{-\infty}^{\infty} v^2(t) dt \quad (8)$$

また、波動エネルギーの主要部分が継続時間 T_d の間にあるとみなせる場合には式(8)は

$$I_{01} = \int_0^{T_d} v^2(t) dt \quad (8)$$

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。

$$I_{02} = \int_0^{T_d} (PPV/\sqrt{2})^2 dt = \frac{1}{2} \cdot (PPV)^2 \cdot T_d \quad (9)$$

いま、式(7)を変形すると

$$I_{01} = \frac{1}{(2.74)^2} \cdot (PPV)^2 \cdot T_d \quad (10)$$

であるから、式(9)、(10)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。

$$\frac{I_{01}}{I_{02}} = \frac{2}{(2.74)^2} = 0.266 \quad (11)$$

ここで、速度波形 $v(t)$ と、それと同じ継続時間を有する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いれ、式(8)'、(9)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される。すなわち、

$$\text{実効値の比} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} v^2(t) dt}}{\sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} (PPV/\sqrt{2})^2 dt}} = \sqrt{I_{01}/I_{02}} = 0.516 \quad (\because \text{式(7)}) \quad (12)$$

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

$$\Delta VL = 20 \cdot \log_{10} (0.516) \approx -5.7(\text{dB}) \quad (13)$$

となることを意味する。すなわち、常に約5.7dB、衝撃正弦波形の方が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(4)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6dB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6dBであることから

$$\begin{aligned} VL &= 20 \cdot \log_{10} (PPV) + 91 \\ &+ 10 \cdot \log_{10} (1 - e^{-T_d/0.63}) - 6 \\ &= 20 \cdot \log_{10} (PPV) \\ &+ 10 \cdot \log_{10} (1 - e^{-T_d/0.63}) + 85 \end{aligned} \quad (14)$$

5. 速度波形より推定された振動レベルの精度の検討

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(14)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と目視による T_d ($T_{d,m}$)から、これらを式(14)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4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5dB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。

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)国松・中川・三浦・今村：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。3)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。

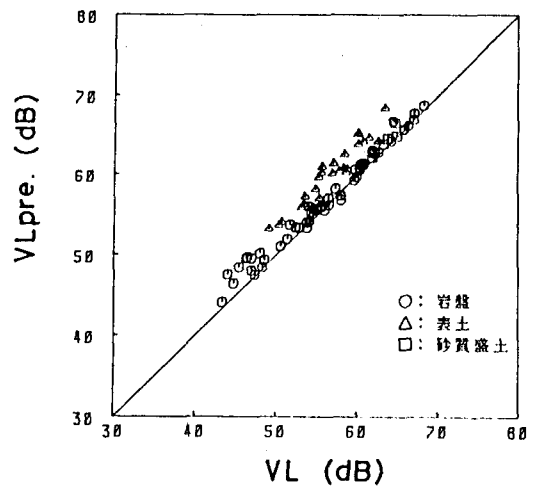


図-4 $VL_{pre.}$ と VL との関係

(31) ESTIMATION OF THE VIBRATION LEVEL FROM IMPULSIVE VELOCITY WAVES

by

S.KUNIMATSU^{*}, F.MIURA^{*}, T.IMAMURA^{**} AND K.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 VL have been investigated but there are still problems to be solved.

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 rms(root-mean-square) of the accelerogram which is filtered through the response characteristics of human body, the VL was obtained from a 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.

^{*} Faculty of engineering, Yamaguchi University

^{**} Cement Division, Ube Industries LTD.