

# 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

## ON RELATIONSHIPS BETWEEN PARTICLE VELOCITY AND VIBRATION LEVEL IN BLASTING VIBRATIONS

北村 泰寿\*

By Yasutoshi KITAMURA

This paper consists of two parts; the first is concerned with the proposition of numerical simulation method which computes vibration levels from digital data of vibrations, and the second is for the investigation of relationships between particle velocity and vibration level in blasting vibrations. Although blasting operations have not been included in the subject of the vibration regulation law, the measurement of blasting vibrations as a nuisance to the neighborhood would undoubtedly be performed hereafter by using vibration level meters. Therefore, much attention is paid to discussing the attenuation of vibrations for shock vibrations such as blasting vibrations in this paper. These characteristics of vibration levels are produced by the dynamic characteristics of vibration level meters.

### 1. ま え が き

宅地造成工事やトンネル工事などのため、人家の近くで発破作業を行うとき、発破振動が建物や住民等に及ぼす影響が懸念されることが多い。昭和51年12月から施行された振動規制法によって、振動公害として問題となる振動は振動レベル(VL)で規制されている。発破振動はこの法律の規制対象には含まれていないが、今後発破振動の測定、評価も振動レベルによってなされるものと思われる。このような状況において、本研究は、従来から発破振動の測定、評価に用いられてきた振動速度と振動レベルの対応関係を知るために行った基礎的研究である。

本研究の標題に関しては、振動速度と振動レベルの2系統の計測システムで同時測定を行うか、振動加速度の測定データを積分して振動速度を計算するとともに、VAL-VL変換器(VAL:振動加速度レベル)を利用して振動レベルを求めればよい。これに対して、本研究では振動レベル計(JIS C 1510規格)の回路と等価な応答を示す回路計算式を用い、振動速度の測定データをA-D変換して、デジタル計算機処理によって振動レ

ベルに換算する。この回路計算式は振動レベルでの振動予測問題の数値解析にも組み込むことができ、本研究はこの計算式の1適用例として得た成果である。

### 2. 振動レベル計の回路計算式

振動レベルのデジタルシミュレーションに関係するものとしては、佐々<sup>1)</sup>、中川<sup>2)</sup>の研究がある。佐々は、発破振動の予測手法の一環として、振動加速度の時系列をCR回路に入力し、出力として振動加速度レベルを得ている。また、中川らは発破振動の効果を振動レベルで推定するのに際して、周波数領域での振動加速度レベルのエネルギー和より振動レベルを求めている。一方、本研究では、振動レベル計の構成回路の時系列応答計算式を一連の差分方程式で表わし、この式によって振動レベルの直接シミュレーションを行う。

振動レベル計は図-1に示すいくつかの回路によって構成されている。同図において、振動検出器については、その出力を対象としているため、この特性については考

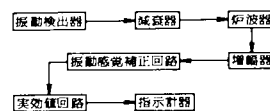


図-1 振動レベル計の構成

\* 正会員 工博 神戸大学助教授 工学部土地造成工学研究施設 (〒657 神戸市灘区六甲台町)

えない。また、減衰器および増幅器についてはその役割から考えて<sup>3)</sup>、これらの周波数特性が本研究で対象とする周波数領域内(10~120 Hz程度)の波形には影響を与えないものと考え、したがって、本研究で必要となるものはカ波器、振動感覚補正回路、実効値回路、指示計器の回路計算式である。なお、計算式の誘導には線形デジタル・フィルタ設計理論が主な役割を果たすが、本文では設計の詳細は文献4)に譲り、一連の差分方程式で表わされる各回路の最終計算式を下記にまとめておく。

(1) 炉波器

遮断周波数 90 Hz で利得が 3 dB 下がり、遮断周波数以上で -12 dB/oct の減衰をもつ二次のローパスフィルタとして設計すれば次式が得られる。

$$y(n\Delta t) = (1 - 2e^{-a\Delta t} \cos a\Delta t + e^{-2a\Delta t})x(n\Delta t - \Delta t) + 2e^{-a\Delta t} \cos a\Delta t y(n\Delta t - \Delta t) - e^{-2a\Delta t} \cdot y(n\Delta t - 2\Delta t) \quad (n=1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

ただし、 $x(t)$ 、 $y(t)$  は以下の各式における記述も含めて各回路での入力および出力の時系列を意味し、 $\Delta t$  はサンプリング間隔、 $a$  は遮断周波数での利得から決定される値で、 $a=400.3345$  である。

(2) 振動感覚補正回路

1~90 Hz の周波数範囲において、JIS C 1510 規格では図-2 に示すような振動感覚補正特性を規定しているが、振動規制法では鉛直振動のみについて規制している。したがって、本研究では鉛直振動特性のみを対象として、周波数応答が 4.5 Hz で最大値をとり、20 Hz で約 8 dB の減衰(8 Hz 以上の周波数に対して -6 dB/oct の減衰)となる振幅変化特性をもつ二次のローパスフィルタとして設計する。

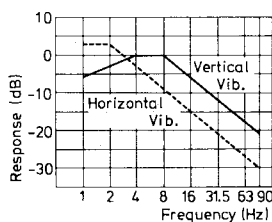


図-2 振動感覚補正特性 (JIS C 1510)

$$y(n\Delta t) = Kx(n\Delta t) - Ke^{-b\Delta t} \{ \cos c\Delta t + (b/c) \cdot \sin c\Delta t \} x(n\Delta t - \Delta t) + 2e^{-b\Delta t} \cdot \cos c\Delta t y(n\Delta t - \Delta t) - e^{-2b\Delta t} \cdot y(n\Delta t - 2\Delta t) \quad (2)$$

ただし、 $b$ 、 $c$  は 4.5 Hz および 20 Hz での利得を考慮して決定される値で、 $b=25.8874$ 、 $c=11.3702$  である。また、係数  $K$  はデジタル・フィルタの利得をアナ

ログ・フィルタの利得と一致させるための定数で  $\Delta t$  に依存する(たとえば、 $\Delta t=1/500$  s のとき、 $K=0.09815$  である)。

(3) 実効値回路

補正回路の交流出力をこの回路に通すことによって実効値波形が得られる。本研究では 2 乗回路、平滑回路、開平回路の結合回路として取り扱い、平滑回路は一次のローパスフィルタ(CR 積分回路)として設計すれば以下の各式が得られる。

$$y(n\Delta t) = x^2(n\Delta t) \quad (2 \text{ 乗回路}) \quad (3)$$

$$y(n\Delta t) = (1 - e^{-\Delta t/\tau})x(n\Delta t) + e^{-\Delta t/\tau}y(n\Delta t - \Delta t) \quad (\text{平滑回路}) \quad (4)$$

$$y(n\Delta t) = \sqrt{x(n\Delta t)} \quad (\text{開平回路}) \quad (5)$$

ただし、 $\tau$  は時定数である。

(4) 指示計器

指示計は可動コイル形出力変換器で、実効値回路の時定数と指示計回転部の慣性によって指針の振れを平滑化するが、入力周波数が高い場合には指示計を無視しても差し支えない。本研究では、指示計を二次のローパスフィルタとして設計する。

$$y(n\Delta t) = (1 - 2e^{-g\Delta t} \cos h\Delta t + e^{-2g\Delta t})x(n\Delta t - \Delta t) + 2e^{-g\Delta t} \cos h\Delta t y(n\Delta t - \Delta t) - e^{-2g\Delta t} \cdot y(n\Delta t - 2\Delta t) \quad (\text{指示計}) \quad (6)$$

ただし、 $g=2\pi\zeta f_n$ 、 $h=2\pi f_n\sqrt{1-\zeta^2}$ 、 $f_n$  は固有振動数、 $\zeta$  は減衰定数である。なお、 $f_n$ 、 $\zeta$  については、JIS 規格における指示計器の動特性の規定と指針の振れの平滑化を考慮して、 $f_n=2.725$  Hz、 $\zeta=0.8$  とする(すなわち、 $g=13.6973$ 、 $h=10.2730$ )。

指示計の目盛は対数目盛で、指針の振れ角を dB 値で読み取るようになっている。したがって、振動規制法に規定する振動レベルは次式のように求められる。

$$y(n\Delta t) = 20 \log_{10} x(n\Delta t) + 60 \quad (\text{dB 値}) \quad (7)$$

3. 回路計算式に対する若干の検討

前章で得られた回路計算式に対して、若干の基礎的な検討を行っておく。

(1) 総合周波数特性

回路計算式へ入力する連続正弦振動の周波数を変えて求めた総合周波数特性を図-3 に示す。同図には、JIS 規格の許容範囲と実測値も示してあるが、実測値については JIS 規格以前の振動レベル計で、日本音響学会規格<sup>5)</sup>に従う計器に対するものである。入力周波数が 90 Hz 以上のときには、炉波器による遮断特性(-12 dB/oct)と振動感覚補正回路による減衰特性を 90 Hz 以上に延長した減衰特性(-6 dB/oct)との相乗によっ

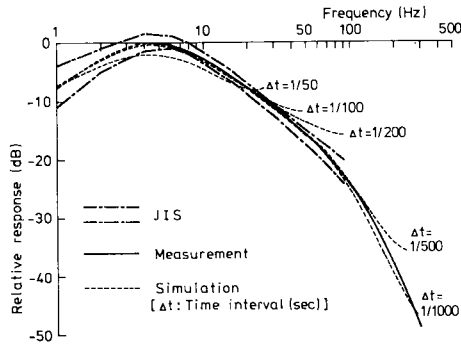


図-3 総合周波数特性

て総合特性は急な減衰を示すことがわかる。また、回路計算式による周波数特性はサンプリング間隔  $\Delta t$  に依存しており、本研究では今回対象とする周波数範囲（10～120 Hz 程度）を考慮して、 $\Delta t=1/500$  s を最適なサンプリング間隔とした。

(2) 振動継続時間とレベル低下

継続時間の短い衝撃正弦振動（パースト信号）に対する振動感覚は、同振幅の連続正弦振動の場合に比べて大きさの感覚量が低下することが知られている。図-4 は三輪ら<sup>6)</sup>による人体感覚と回路計算式による相対レスポンスを示したものである。同図において、人体感覚のレベル低下は約  $-7$  dB/decade となっており、実効値回路の時定数  $\tau$  が約  $0.6$  s の場合に相当している。なお、図中の計算値は  $\tau=0.6$  として求めたものである。

(3) 実測波形との対比

トンネル発破による上下振動を上かぶり約  $150$  m の地表面で測定したデータについて、パワースペクトルを図-5, 6 に、また振動加速度波形と振動レベル波形を図-7, 8 に示す。パワースペクトルより、主要周波数は  $30\sim 90$  Hz の範囲にあることがわかる。また、振動レベルの実測波形と計算波形の対比においては、計算波形

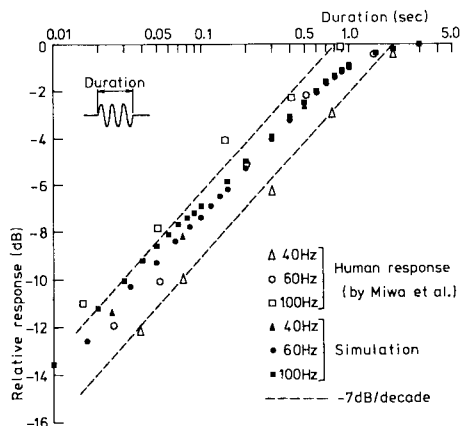


図-4 振動継続時間とレベル低下

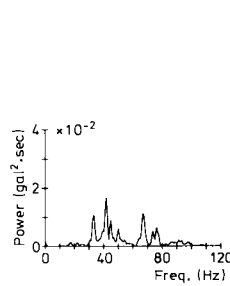


図-5 パワースペクトル (No.1 測定)

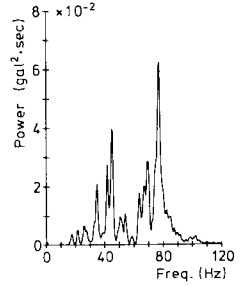


図-6 パワースペクトル (No.2 測定)

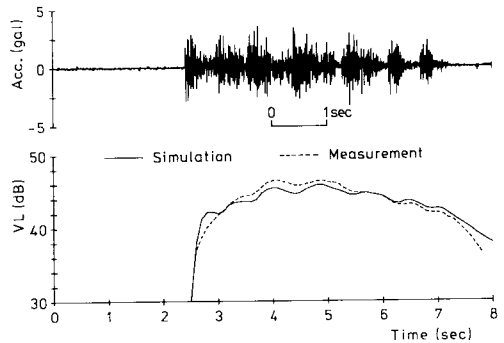


図-7 発破振動の加速度波形と振動レベル波形 (No.1 測定)

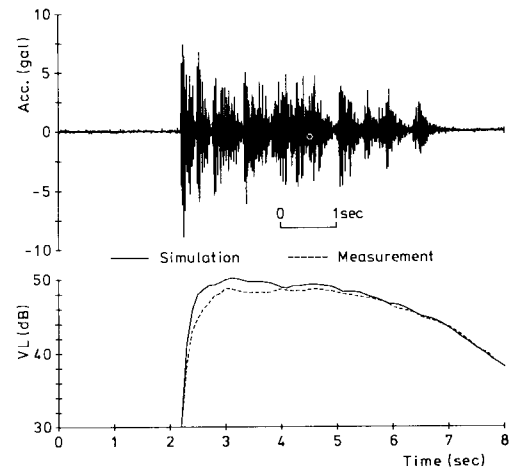


図-8 発破振動の加速度波形と振動レベル波形 (No.2 測定)

が初動部で多少実測波形より大きくなる傾向にあるが、初動部以外では両者は約  $1$  dB～ $2$  dB 弱の差異となっている。特に、初動部の差異は継続時間の短いパースト信号に対する立ち上がり特性の比較においてもみられた現象<sup>4)</sup>である。これらの点については、今回無視した増幅器の過負荷特性<sup>3)</sup>、また実測波形の読み取り装置による誤差などの影響も考えられる。したがって、各回路の周波数特性に注目して、規格に合致するように設計した回

路計算式の問題のみではなく、実測波形に対する回路特性にも問題があるものと推察される。

ところで、トンネル発破のような段発発破の場合には初段(心抜き)の振動が大きくなるのが知られており、図-8の振動加速度波形においても顕著である。しかし、図-7, 8の振動レベル波形より、初段の振動レベルは必ずしも大きくはならないことがわかる。これは他の処理データにおいてもみられた現象で、振動感覚補正回路の過渡応答特性および実効値回路での平滑化に起因するものである<sup>11,4)</sup>。

#### 4. 振動速度と振動レベルの対応

前章での検討結果より、本研究で求めた回路計算式による計算波形は現有の振動レベル計による実測波形と初動の立ち上がり部分で多少差異が生じるが、全体的には回路計算式は実測の振動レベルを十分シミュレートしているとみなしてよい。したがって、この回路計算式を利用して、図-7, 8の測定と合わせて実施した多点同時測定(地盤上3測点, 家屋内2測点)の振動速度データより振動レベル波形を計算し、振動速度と振動レベルの対応を調べる。図-9は実測の振動速度と振動レベルの計算値の対応関係を図示したものである。なお、同図は2回分の発破に対する結果を図示しているが、1発破についてそれぞれの測点の最大値を1つ取り出して対応させたものではない。たとえば、図-7, 8の振動加速度波形にみられるように、振動速度波形も継続時間0.1~0.3秒の波群の連続となっている。この波群数個の最大振動速度値をそれぞれ読み取り、同時刻付近の振動レベルのピーク値と対応させたものである。

いま、図-2の鉛直振動特性より、8 Hz以上の単一周

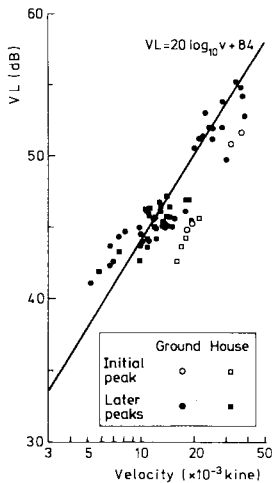


図-9 振動速度と振動レベルの対応 (No. 1, 2 測定)

波数の連続正弦振動に対する振動レベルは振動速度と次のような理論式によって関係づけられる<sup>3)</sup>。

$$VL = 20 \log_{10} v + 91 \dots\dots\dots (8)$$

ただし、VLは振動レベル (dB)、vは振動速度 (kine) である。ところで、図-9に示すように、式(8)の理論換算式から7 dBを引いた式を図示すると初動部を除く測定データの平均値に近い式となっていることがわかる。約7 dBのレベル低下は、図-4に示す単一パースト信号の継続時間で評価すれば、約0.1秒前後の時間となっている。したがって、段発発破を用いるような発破作業によって生じる継続時間の短い振動の振動レベルは、振幅が等しい連続振動の振動レベルよりも相当小さくなり、そのレベル低下量は継続時間に依存していることを認識しなければならない。

#### 5. あとがき

本研究では、JIS C 1510の規格を満足している振動レベル計の回路計算式を利用して、継続時間が短い振動の場合には同振幅の連続振動より振動レベルが低下する様相を明らかにした。また、段発発破のとき、初段の発破に対する振動速度ないしは振動加速度が後段の発破に対するそれよりも大きくなる場合でも、振動レベル計の回路特性によって初段の振動レベルは必ずしも大きくなり、今回のトンネル発破による測定データでは、主要周波数成分は90 Hz以下となっているが、90 Hz以上の周波数(岩盤露頭などでは生じることがある)に対しては炉波器の遮断特性によるレベル低下も考慮しなければならない。また、90 Hz以下の周波数成分をもつ発破振動に対して、連続正弦振動の理論換算式より振動レベルの低減量をどの程度に見積るかは継続時間に依存しており、その定量的把握は今後多くのデータに対して検討を要する課題である。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) 中川浩二ほか4名：ゆるめ発破における発破振動の推定、第16回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.255~259, 1984.
- 3) 庄司 光・山本剛夫・畠山直隆：衛生工学ハンドブック(騒音・振動編)、朝倉書店、1980.
- 4) 北村泰寿：振動レベル波形のデジタルシミュレーション、建設工学研究所報告、第26号、pp.340~359, 1984.
- 5) 騒音研究委員会振動分科会：振動レベル計の規格について、日本音響学会誌、26巻、10号、pp.488~494, 1970.
- 6) 三輪俊輔・米川善晴：衝撃振動の評価法、日本音響学会誌、27巻、1号、pp.33~39, 1971.

(1984.11.19・受付)