

1 まえがき

公害振動に対する関心が最近では非常に高まり、振動レベルを用いた発破振動に対する規制が建設工事現場や鉱山等でも行なわれるようになってきている。振動レベルは人体感覚を加味した評価法として公害振動には一般に用いられている評価法である。この振動レベルの測定方法はJIS規格で規定されており振動レベル計の指示値により得られる。このことより、振動レベルに関する検討を行なう場合には、振動レベル計を用いるか、振動レベル計の特性を十分に再現できるシミュレーション手法によらなければならない。

一方、従来の発破振動の推定は最大速度振幅をその対象としており、振動レベルについての推定については $V=KW^a D^b$ をもとにした $VL=91+20\log(KW^a D^b)$ が用いられているようである。そしてこれまで、段発発破における秒時差は振動レベルと密接に関連していることが容易に想像できるにもかかわらず振動レベルの推定にはこれは考慮されておらず、その影響の程度も明らかにされていない。本研究は振動レベル計の動特性をシミュレーションするためのプログラムを作成し、そのプログラムを用いて振動レベルに対する段発発破の秒時差の効果について検討を行なったものである。

2 振動レベルおよび振動レベル計の動特性

振動レベルはJIS Z8735 (振動レベル測定方法) において、JIS C1510 (振動レベル計) で定められた振動レベル計で振動レベルを測定することが規定されている。振動レベルは振動加速度レベルに人体感覚の補正を加えたものであり、人体感覚は図1で近似されるような周波数特性を有している。従って、振動レベル計は図1に示される振動感覚補正回路を備えていなければならないとされている。

また、単一バースト振動の継続時間と人体が感じる振動の大きさとの関係には図2に示すような関係がある。この実験結果をもとに振動レベル計の電気回路において整流回路の平滑時定数が0.6秒に相当する動特性を持つように振動レベル計の指示部の動特性は規定されている。図2に対してこの特性は点線と実線のほぼ中間のレスポンスを持つことになる。

発破により生じる振動は一般に継続時間が1秒以下であるので振動レベル計の指示部の動特性が振動レベルの予測に対して非常に重要と考えられる。そのため、本研究では佐々¹⁾により考えられた振動レベル計の指示部の動特性をシミュレーションするための電気回路(図3)をもとに振動レベルを求めるプログラムを作成した。

3 振動レベルへ及ぼす秒時差の効果の数値シミュレーションによる検討

3・1 振動レベル計の指示部の動特性のシミュレーション

図3の回路において二乗された入力電圧をVs、コンデンサー電圧をVcとすれば以下に示す式を用いて時間領域でVcnを求め、そのVcnの平方根の値を算出することで指示部の動特性のシミュレーションを行なった。

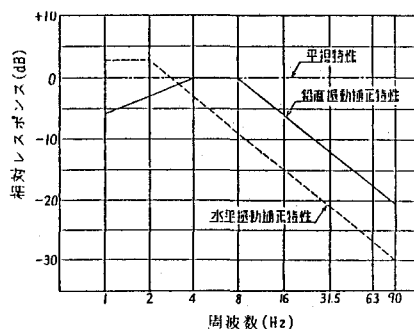


図1 相対レスポンスと周波数の関係

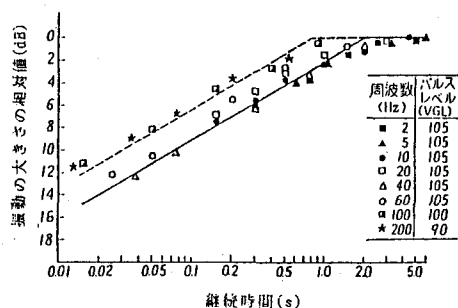


図2 正弦振動の継続時間とレベル差の関係

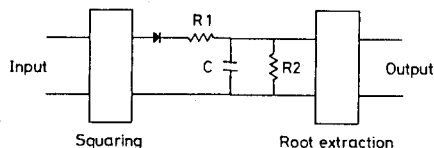


図3 振動レベル計の指示部の動特性のシミュレーションのための電気回路

1) 立上り特性 $V_s \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \geq V_{co}$

$$V_{cn} = (V_s \cdot R_2 / (R_1 + R_2) - V_{co}) \left(1 - e^{-\frac{at}{T_1}}\right) + V_{co} \quad \text{--- (1)}$$

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

T_1 は時定数であり、 $T_1 = CR_1R_2 / (R_1 + R_2)$

C はコンデンサー容量、 R_1, R_2 は抵抗

Δt は時間間隔

2) 下降特性 $V_s \cdot R_2 / (R_1 + R_2) < V_{co}$

a) $V_s \geq V_{co}$

$$V_{cn} = (V_{co} - V_s \cdot R_2 / (R_1 + R_2)) \cdot e^{-\frac{at}{T_1}} + V_s \cdot R_2 / (R_1 + R_2) \quad \text{--- (2)}$$

b) $V_s < V_{co}$

$$V_{cn} = V_{co} \cdot e^{-\frac{at}{T_2}} \quad \text{--- (3)}$$

ここで、 T_2 は時定数であり、 $T_2 = CR_2$

上記のプログラムに実効値で1000galの振幅を持つ正弦波振動を入力した時、 V_{cn} が収束する値を120dBとして振動レベルを算出するようにプログラムを修正し、試行錯誤的に C, R_1, R_2 を変化させ振動レベル計が示す立上り特性および下降特性を近似させた。その結果、 C を100 μ F、 R_1 を30k Ω 、 R_2 を9.3k Ω としたときの特性が振動レベル計の指示部の動特性とよく一致したので以下の解析ではこれらの値を使うこととした。

図4 a) は計量法検定合格品の振動レベル計(リオン社製VM-14B)の入力端子に振動レベルが120dBになるような周波数50Hzの正弦波を入力した瞬間からの振動レベル計の出力結果(破線)と、これと上述した計算プログラムを用いて振幅が実効値で1000gal(120dB)の正弦波を入力した際の計算結果(実線)とを継続時間2秒で比較したものである。また、図4 b) は50Hzの正弦波の入力を停止した瞬間からの両者の比較を行なったものである。このように計算結果は立上り特性および下降特性とともに非常によく振動レベル計の動特性をシミュレートしていることがわかる。

3・2 モデル波形を用いた秒時差の変化に伴う振動レベル段発発破はある秒時差のもとに単発発破が繰り返される発破である。このような発破での加速度波形を考えれば秒時差が十分に長く

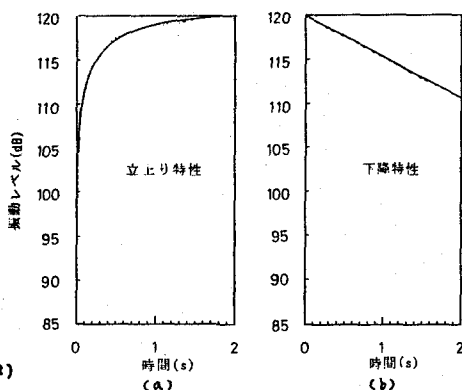


図4 振動レベル計の指示部の動特性および数値シミュレーション特性

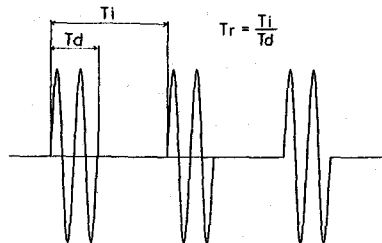


図5 間欠正弦振動波形(モデル波)

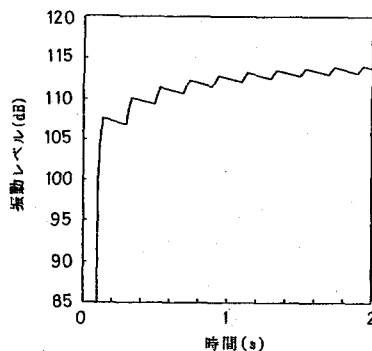


図6 モデル波入力に対する振動レベル出力波形

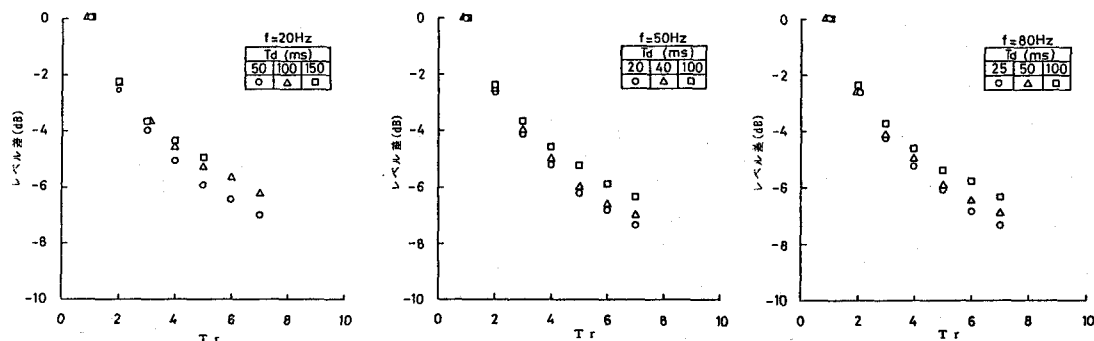


図7 モデル波についてのレベル差と T_r との関係

各発破により生じる加速度波形が相互に影響を及ぼさ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考えられる。そこで、単発発破により生じる加速度波形を正弦波形と考えた間欠正弦波形（モデル波）、即ち、段発発破の秒時差が一定で、無限に同一の単発発破が続くものと仮定した波形を用いて、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。図5は入力モデル波の波形を示したものであり、図中のTdは単発発破による加速度波形の継続時間であり、Ti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いろいろな周波数および継続時間を有するものが考えられる。また、振動レベル計の振動感覚補正特性は1Hz～80Hzの範囲で規定されている。これらのことを考慮して、モデル波の周波数として20、50、80Hzの3種類を考え、継続時間については被数を変化させることにより20ms～150msの種々の波を考えた。これらのモデル波に対して $Tr(=秒時差(Ti)/波の継続時間(Td))$ の増加に対する振動レベルの低減を調べた。ここで、 $Tr=1$ は連続正弦波形であり、波が重畳しない範囲では最大の振動レベルを示すので、この値を規準として他の $Tr>1$ の振動レベルに対する差（以下レベル差）を算出した。なお、図6は数値シミュレーションより得られた $f=50Hz$ 、 $Td=40ms$ 、 $Ti=200ms$ のモデル波を入力したときの振動レベル出力波形である。振動レベルはこのような出力波形に対して包絡線をひき、信号入力時から2秒後の振動レベルとして求めた。

図7は同一周波数での継続時間をパラメータとしたときの秒時差の増加にともなうレベル差を示したものであり、各周波数や継続時間の違いによる差よりレベル差の低減には Tr が大きく影響し、 $Tr=7$ では約7dBの低減が見込まれることがわかる。

周波数の影響を同一継続時間($Td=100ms$)の結果について見れば、 $Tr=7$ に対して20Hzでは-6.26dB、50Hzで-6.36dB、80Hzで-6.36dBとほとんど差がなく周波数の影響はレベル差の低減に対して考慮する必要がないと思われる。

次に、継続時間の影響を同一周波数(50Hz)の結果について見れば、 $Tr=7$ に対して $Td=20ms$ では-7.37dB、 $Td=40ms$ で-7.00dB、 $Td=100ms$ で-6.36dBと Td の増大にともないレベル差は小さくなる傾向がみられるが、 Tr の影響から考えれば極くわずかといえる。

4 実振動加速度波形を用いた秒時差の変化に伴う振動レベル

石灰石岩盤上で記録した単発発破の加速度波形²⁾を用いて、振動レベルに及ぼす秒時差の影響を数値シミュレーションすることを次に試みた。用いた加速度波形は爆源から100m、150m、200m離れた地点で観測されたものである。実振動加速度波形（以下実波形）より振動レベルを求める場合には、図2に示された振動感覚補正を行なう必要がある。そこで、北村ら³⁾によりデジタルフィルター理論を用いて導出された差分方程式を使用して振動感覚補正を行なった加速度波形を先に作成したプログラムへ入力することにより振動レベルを算出した。ここで、実波形はモデル波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、地震の分野で広く用いられているE.H.Vanmarckeら⁴⁾により提案された次式を用いて継続時間を決定した。

$$Td = (2.74)^2 \frac{I_0}{a^2_{max}} \quad \text{--- (4)}$$

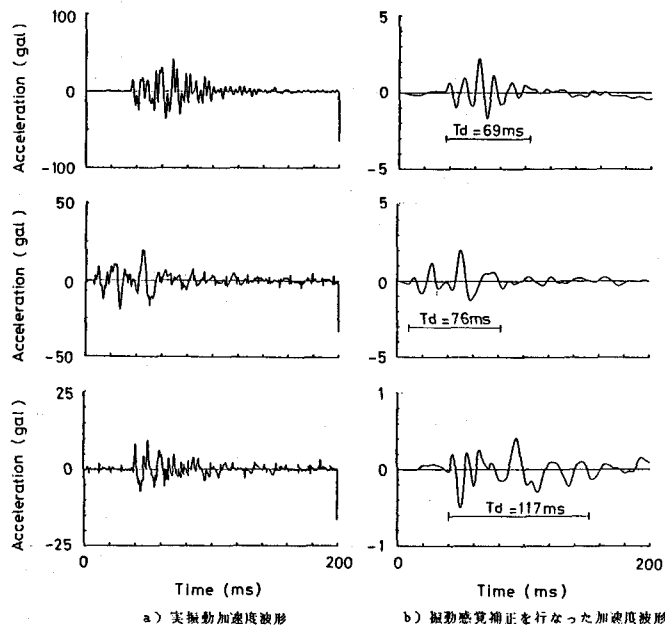


図8 実振動加速度波形と算出された継続時間との関係

ここに、 T_d は継続時間、 I_0 は全振動エネルギー (cm^2/sec^3)、 a_{max} は加速度の最大値 (cm/sec^2) である。

図8に振動感覚補正を行なう前、行った後の実波形およびこれに対して算出された継続時間を示す。この継続時間を用いてモデル波と同様に T_r に対するレベル差を求めた結果を図9に示す。この結果はモデル波で得られた結果とほとんど同様で $T_r=7$ に対して約 7 dBの低減が見込まれることを示している。

5 秒時差を考慮に入れた振動レベル差の推定

段発発破における秒時差の効果を考慮に入れた振動レベルの推定に関して上述の結果より次式が考えられる。

$$VL = (T_r=1 \text{ に対する振動レベル}) - (\text{レベル差}) \quad \text{--- (5)}$$

ここで、 $T_r=1$ に対する振動レベルは単発発破の実波形記録を用いて (4) 式により波形の継続時間を決定した後、数値シミュレーションを行なって求める必要がある。

レベル差については図7、図9より次式が考えられる。

$$\text{レベル差} = A(T_d) \cdot \log(I/T_r) \quad \text{--- (6)}$$

上式を用いて図7のモデル波の結果に対して各周波数、各継続時間について回帰分析を行ない算出した係数 A の値を T_d に対してプロットすると図10のようになる。さらに、この関係について回帰式を求めた結果を (6) 式に代入すれば次式を得る。

$$\text{レベル差} = (-0.013 T_d + 8.975) \cdot \log(I/T_r) \quad \text{--- (7)}$$

なお、図10の黒丸は実波形に対して得られた係数 A であり回帰直線のまわりに分布していることがわかる。(7) 式を用いて実波形に対するレベル差の予測を行なった結果、図10からもわかるように $T_d=78\text{ms}$ の実波形で最大の誤差を生じるがその大きさは約 0.7dBと小さい値を示すことから、(7) 式を用いたレベル差の予測はほぼ妥当であるといえよう。

(5) 式を使って VL を推定するに際しては試験発破などにより加速度波形を得る必要がある。しかしながら、第2項のレベル差に関しては本研究の成果、即ち、式(7)より波形はなくても推定することが可能となる。

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、pp16~23(1981)。
- 2) 国松、中川、三浦、中満：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、pp121~127(1984)。
- 3) 繁縄、北村、桜井：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、土木学会第39回年講、pp885~888(1984)。
- 4) E.H.Vanmarcke et al : Strong-Motion Duration and RMS Amplitude of Earthquake Records、BSSA、Vol.70、No.4、pp1293~1307(1980)。

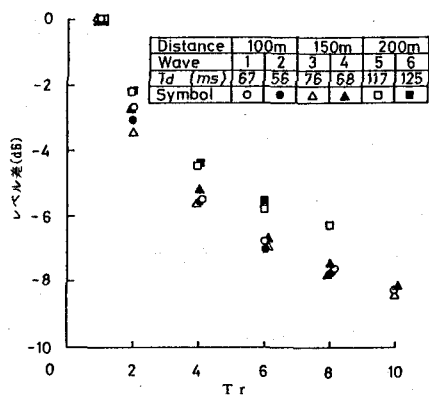


図9 実振動加速度波形についてのレベル差と T_r との関係

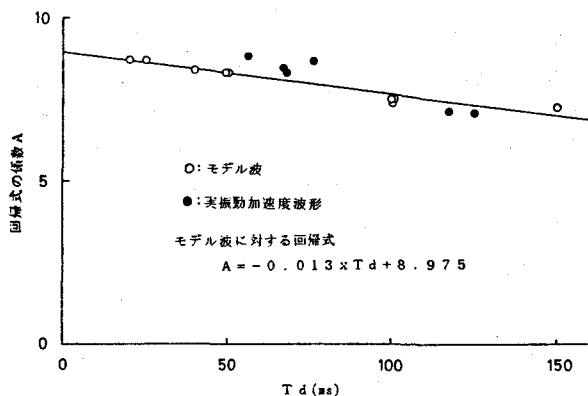


図10 継続時間と回帰式の係数 A との関係

(25) ESTIMATION OF THE VIBRATION LEVEL OF THE DELAY-BLASTING

Sunao KUNIMATSU, Koji NAKAGAWA and Fusanori MIURA

Recently, there is a tendency that the blasting vibration is regulated by the vibration level from a point of the vibration pollution. The vibration level must be measured by the vibration level meter that satisfies JIS. On the other hand, the time delay in the delay-blasting is considered to have relation to the level. This study aims to clarify the effect of the time delay on the level and to find the relationship between the delay and the reduction of the level.

First, we made researches on the vibration level meter, and approximated its characteristic with a electric circuit that can be calculated numerically. Namely, we developed a computer program which could simulate the response of the level meter.

Second, using the simulation program, we investigated the effect of the time delay on the level with model waves of intermittent sine wave. Parameters of the model waves are frequency, duration time(T_d) and time delay(T_i). We also introduce a new parameter Tr defined as $Tr = T_i/T_d$. Intermittent sine wave becomes continuous sine wave at $Tr=1$. We treat only model waves of $Tr > 1$. Therefore, vibration level has the maximum value at $Tr=1$. The relationship between the reduction of the level and the time delay was discussed and it was found that the longer the time delay the larger the reduction. The relation is given by the following equation:

$$VLd = (-0.013 \times T_d + 8.975) \times \log(1/Tr)$$

where, the VLd is the difference of the level at $Tr \geq 1$ from that at $Tr=1$. $VLds$ are 7-8dB at $Tr=10$.

Next, the same results were obtained from observed blasting accelerograms. The difference between the results from model waves using the above equation and those from observed waves is under 0.7dB. This confirms that the above equation can be used when VLd is estimated.