

段発発破振動速度波形からの振動レベルの算出

ESTIMATION OF THE VIBRATION LEVEL FROM VELOCITY WAVES INDUCED BY DELAYED BLASTING

国松 直*・三浦房紀**・今村 威***・中川浩二****

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

This study aims to propose a method to estimate the vibration level (VL) of delayed blasting from its velocity wave. We consider that the wave is made of sequential impulsive waves. In the method, we first divide the velocity wave induced by delayed blasting into impulsive waves. Then, we calculate the VLs for the individual impulsive velocity waves. Finally, the VL of the delayed blasting wave is obtained from the VLs of individual impulsive velocity waves taking into account the attenuation characteristic of the vibration level meter. It was found that the proposed method is sufficiently useful to estimate the tendency of the change with time and the magnitude of the VL for recorded velocity waves induced by delayed blasting.

Keywords: blasting vibration, vibration level, velocity wave

1. 緒 言

住宅地近傍でのトンネル掘進や市街地近くの露天掘鉱山での鉱石採掘などにおいて発破振動の規制が問題になることがしばしばある。この場合、発破振動の規制は最大速度振幅 (PPV(cm/s)) か振動レベル (VL(dB)) を用いて行われるが、実際に計測記録されることの多い振動速度記録をもとに振動レベルが求められれば好都合なことが多い。

最大速度振幅から振動レベルを算定する場合には、鉛直振動に対して次式で与えられる変換式¹⁾

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

がよく用いられるようである。しかし、この式は周知のごとく、最大速度振幅を振幅とする周波数 8 Hz 以上の連続正弦速度波形 (継続時間無限大) に対して成立する理論的な変換式である。したがって、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。この問題を改善するために、式 (1) の定数項を統計的に求めた関係式も使用されている^{2),3)}。

この関係をより正確に求めるため、著者らは前報⁴⁾において単発発破の振動速度波形の最大速度振幅 (PPV) と Vanmarcke and Lai⁵⁾ の式により算出した継続時間 ($Td. v(s)$: 添字 v は Vanmarcke の頭文字) から振動レベルを算出する次式を提案した (詳細は文献⁴⁾ 参照)。

$$VL = 20 \cdot \log_{10}(PPV) + 10 \cdot \log_{10}(1 - e^{-Td \cdot v / 0.63}) + 85 \quad \dots \dots \dots (2)$$

さらに、Vanmarcke and Lai の式から算出された継続時間が目視により判定された継続時間 ($Td. m(s)$: 添字 m は measured の頭文字) と大きく異なることを示した。しかし、発破振動が問題となるところでは通常段発発破が行われ、段発発破の発破振動を算定するには単発発破のみを対象とした式 (2) は必ずしも十分ではない。そこで本報では前報⁴⁾を補完する目的で、式 (2) をもとに段発発破の発破振動レベルを振動速度記録から求める手法について述べる。

* 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 2557)

** 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) 荻田セメント工場・工場長
(〒800-03 福岡県京都郡荻田町長浜)

**** 正会員 工博 山口大学教授 工学部建設工学科
(〒755 山口県宇部市常盤台 2557)

2. 段発発破速度波形からの振動レベルの算出方法

段発発破の振動レベルの算出は、まず各段の個々の振動に対して式(2)を用いて振動レベルを算出した後、簡単なデシベルの加算を行い、各段の段発発破振動レベルを算出するという手順からなる。以下にその計算手順と計算例を示す。

(1) 計算手順

手順①：図一(a)は手順および記号と計算例を示すために実際に記録された基本単発速度波形を秒時差 T_{i1} , T_{i2} で3波重ね合わせたモデル波形である。ここで、モデル波形の秒時差は $T_{i1} = T_{i2} = 500$ msとしている。まず図中の各波形(WAVE 1, WAVE 2, WAVE 3)に相当する個々に分離した波形について、各波形の最大速度振幅(PPV₁, PPV₂, PPV₃)と目視による継続時間($Td.m_1$, $Td.m_2$, $Td.m_3$)を用いて式(2)からそれぞれの振動レベル(VL_1 , VL_2 , VL_3)を算出する。

図一(b)の実線は加速度波形に対して振動レベル計の数値シミュレーション⁶⁾から求めた振動レベルの時間的変動を示したものである。

手順②：段発発破波形が入力する場合、振動レベル計の指針は図一(b)の実線のように波形の入力に従って連続的に変化するが、ここでは図一(b)の破線のように各波形の終了時(波形の継続時間($Td.m$)だけ経過した後)に集中して入力が行われるものと仮定する。振動レベル計は入力がない場合にはその指針は減衰時定数0.63秒に従って低下する。つまり、図一(b)において振動レベルはWAVE 1により点Aで $VL_A (= VL_1)$ まで上昇し、その後WAVE 2の入力直前(前述の仮定により点C)まで減衰する。そして、この瞬間WAVE 2の入力によって振動レベルは再度 VL_c まで上昇すると考える。このように仮定すれば、点Cにおいて波形が入力される直前の振動レベル VL_c' は時定数0.63秒での減衰特性を表す次式より求める。

$$\begin{aligned}
 VL_c &= VL_1 + 10 \cdot \log_{10}(\exp(-(Ta_1 + Td_2)/0.63)) \\
 &= VL_1 - ((10/0.63) \cdot \log_{10} e) \cdot (Ta_1 + Td_2) \\
 &= VL_1 - 6.89 \cdot T_1 \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

ここに、図一(a)に示されているように $T_1 = Ta_1 + Td_2$ であり、WAVE 1とWAVE 2が集中して入力されたとしたときの秒時差(点Aと点Cの時間差)である。式(3)からわかるように振動レベルは点Aにおける VL_A から点C直前の VL_c' まで時間に対し線形に減衰する。

手順③：ところで、複数の振動源による振動レベルはその個々の振動源の振動レベルの和により求められることが理論的に明らかにされている¹⁾。一方、WAVE 2の

入力に対する振動レベルは点Cにおいて上式による VL_c' と VL_2 の振動レベルをもつ振動源が同時に入力したと考えることができる。すなわち、そのときの点Cの振動レベルは VL_c' と VL_2 のデシベルの和を計算することにより求めることが可能となる。その計算式は、たとえば「公害防止の技術と法規(振動編)」¹⁾に示されているように次式で表わされる。

$$VL_c = 10 \cdot \log_{10}(10^{VL_c'/10} + 10^{VL_2/10}) \dots\dots\dots (4)$$

しかし、 VL_c は上式の計算を行わなくても次のように図一2を用いて簡単に求めることが可能である¹⁾。いま、デシベル和を求めるための2つの振動レベルを L_1 と L_2 とする。 $L_1 \geq L_2$ のとき、その和は L_1 に図一2によって与えられる補正值(dVL)を加えれば得られる。以下、手順②、③の繰り返しとなる。

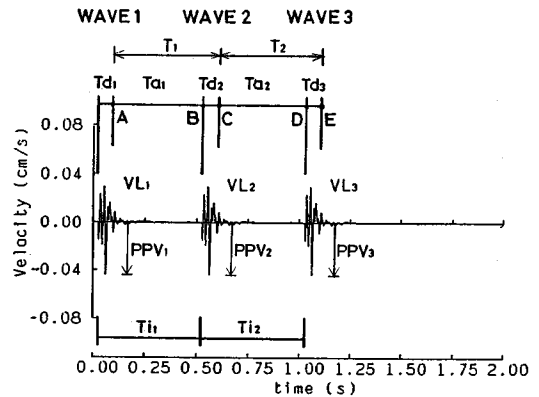
(2) 計算例

図一(a)の振動速度モデル波形を使用して、以下に計算例を示す。

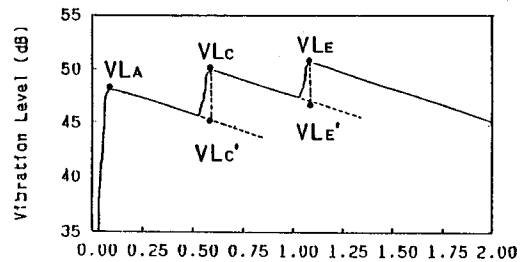
a) WAVE 2入力に対して

手順①：繰り返しの基本速度波形のPPVは0.045 cm/s、目視による継続時間($Td.m$)は0.074 sとする。したがって、式(2)から3つの波形の振動レベルはすべて同じく、48.5 dBと計算される。

基本速度波形に対する加速度波形から求まる振動レベルは48.1 dB(図一(b)の実線参照)であるが、本研究



(a) 振動速度モデル波形



(b) 振動レベルの時間的変動

図一 計算手順と記号の説明および計算例

で提案する手法によると、WAVE 1 の入力に対して振動レベル計の指針は点 A の時点で 48.5 dB まで振れることになる。図-1(b) の実線は前述のように加速度波形から計算された振動レベルの時間的変動であり、点 A の●印 (VL_A) は式 (2) により計算された値を示す。

手順②：点 A での振動レベル $VL_A = VL_1 = 48.5$ (dB) と $T_1 (= Ta_1 + Td_2)$ (図-1(a) 参照) を式 (3) に代入することにより、WAVE 2 の入力前における点 C での振動レベルを計算する。 $T_1 = Ta_1 + Td_2 = 0.426 + 0.074 = 0.5$

$$VL'_C = 48.5 - 6.89 \cdot T_1 = 45.1 \text{ (dB)}$$

手順③：点 C での振動レベルを図-2 の補正值をもとに計算する。

$$|VL'_C - VL_2| = |45.1 - 48.5| = 3.4$$

図-2 より、 $dVL \approx 1.6$ である。ゆえに、

$$VL_C = 48.5 + 1.6 = 50.1$$

b) WAVE 3 入力に対して

手順②：WAVE 3 の入力がない場合の点 E での振動レベルを計算する。 $T_2 = Ta_2 + Td_3 = 0.426 + 0.074 = 0.5$

$$VL'_E = 50.1 - 6.89 \cdot T_2 = 46.5 \text{ (dB)}$$

手順③：点 E での振動レベルを計算する。

$$|VL'_E - VL_2| = |46.5 - 48.5| = 2.0$$

図-2 より、 $dVL \approx 2.1$ である。ゆえに、

$$VL_E = 48.5 + 2.1 = 50.6 \text{ (dB)}$$

以上の結果を図-1(b) に示す。●印が計算結果である。この図から、本方法を用いても各点での振動レベルをほぼ正確に評価することが可能であると考えられる。

3. 実測波形への適用

以上、モデル波形を用いて段発発破の振動レベルの求め方の手順および計算例を示し、その妥当性を確かめた。この章では、この計算方法を施工中の発破振動に対して記録された速度波形に適用し、その妥当性を検討する。

図-3(a) および図-4(a) に代表的と思われる記録された速度波形例を示す。これらの波形から単発発破波形とみなせる波形を分離する。図-3(a) に対しては 14 個、図-4(a) に対しては 18 個である。具体的な計算例を図-3 について示したものが表-1 であり、個々の分離した波形の最大速度振幅 (PPV)、波形の継続時間 ($Td.m$)、式 (2) による個々の波形の振動レベル計算結果 (VL)、秒時差 (T)、式 (3) による振動レベルの減衰 (VL') および図-2 から求めた補正值 (dVL) を示している。デシベルの和は VL と VL' について行われる。その結果が表の右端項 (VL) である。図-3(b)

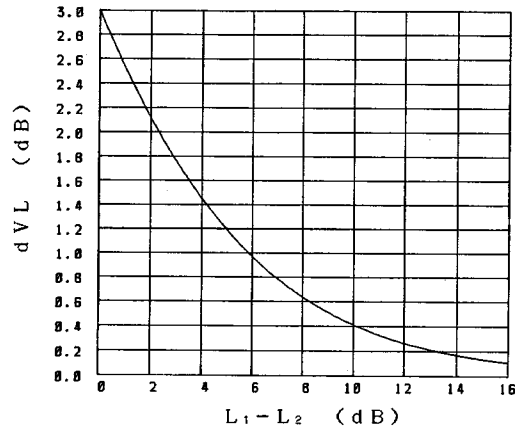


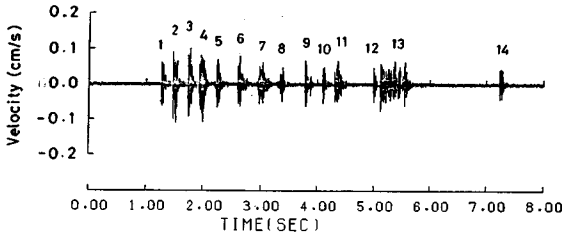
図-2 L_1 と L_2 の和の補正值 (公害防止の技術と法規・振動編¹⁾ による)

表-1 本方法による計算例-1 のための計算表

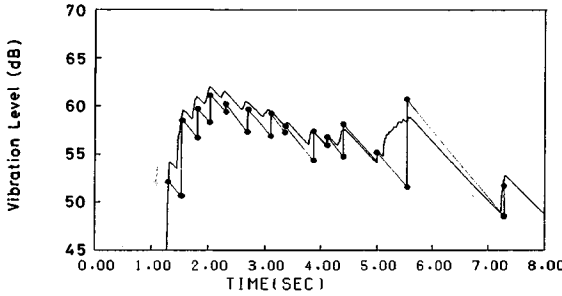
No.	PPV (cm/s)	$Td.m$ (s)	VL (dB)	T (s)	VL' (dB)	dVL (dB)	VL (dB)
1	0.065	0.08	52.0	0.22			52.0
2	0.112	0.10	57.7	0.27	50.5	0.8	58.5
3	0.100	0.10	56.7	0.21	56.6	3.0	59.7
4	0.109	0.11	57.8	0.25	58.3	2.8	61.1
5	0.070	0.08	52.7	0.44	59.4	0.8	60.2
6	0.080	0.13	55.8	0.40	57.2	2.4	59.6
7	0.062	0.20	55.2	0.27	56.8	2.3	59.1
8	0.049	0.07	49.0	0.51	57.2	0.6	57.8
9	0.068	0.13	54.4	0.24	54.3	3.0	57.4
10	0.056	0.07	50.2	0.32	55.7	1.1	56.8
11	0.068	0.17	55.4	0.55	54.6	2.6	58.0
12	0.050	0.05	47.8	0.55	54.2	0.9	55.1
13	0.077	0.47	59.9	1.74	51.3	0.6	60.5
14	0.045	0.08	48.8		49.5	2.9	51.7

および図-4(b) の●印は計算結果であり、速度波形を用いてシミュレーションプログラムにより算出した振動レベルの時間的変動を示す実線 (●印の付いていない曲線) と対比させた。計算結果は実線の時間的変動の傾向およびその大きさの両方ともに非常によく一致しており、本計算方法の妥当性を示しているといえる。

なお、図-3, 4 は加速度波形ではなく速度波形を用いたシミュレーション結果と本研究で提案する手法による結果とを比較しているが、振動速度波形から振動レベルを求める場合の誤差は、前報¹⁾でも述べたように、振動加速度波形中に含まれる 8 Hz 以下、90 Hz 以上の周波数成分の影響および継続時間 ($Td.m$) の決め方により生じる。前者については最大 3 dB 程度の誤差を伴うことになる。一方、後者については目視による継続時間 $Td.m$ を $Td.v$ に対して 2 倍と見積れば 3 dB の誤差を伴うことになるが、若干の熟練を要せばかなり近い値を見積ることが可能となることがわかっている。したがって、加速度波形を用いて (もし得られていたとして) 図-3, 4 と同様の比較を行っても、本研究によって提案された手法の妥当性が大きく損なわれることはないと思

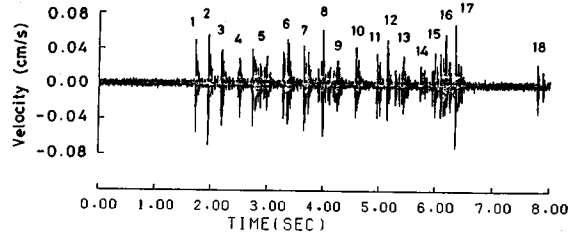


(a) 実測された振動速度波形例-1

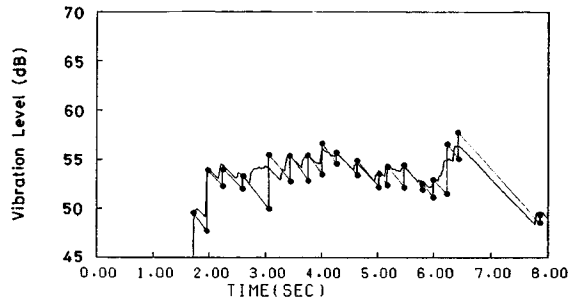


(b) 振動レベルの時間的変動と計算結果

図-3 本方法による計算例-1



(a) 実測された振動速度波形例-2



(b) 振動レベルの時間的変動と計算結果

図-4 本方法による計算例-2

われる。また、本手法による誤差の中には各波形の入力をそれぞれの波形終了時に集中して行うための誤差も含まれるが、この誤差は減衰の時間誤差のみにより生じることから前述の誤差に比べれば非常に小さいと考えられる。

本手法の適用にあたって注意すべき点は、図-3の波形 No. 13 のように継続時間が長い波形に対してその算出に伴う誤差が大きくなることである。それを防ぐには、図-4の波形 No. 15, 16, 17 のように波形の分離を可能なかぎりなるべく細かく行う方が好ましいようである。

4. 結 論

本研究は衝撃的な波形がある秒時差で繰り返されるような段発発破波形を対象に、速度波形から振動レベルを求める方法を示したものである。

算出方法は、まず対象とする段発速度波形を単発発破波形とみなせる波形に分離し、各波形ごとの振動レベルを求め、次に振動レベル計の減衰特性を考慮しながらこれらのデシベル和の計算を行うものである。本方法をまず振動速度モデル波形に対して適用して検討した結果、振動レベルの時間的変動およびその大きさをほぼ正確に

推定できることが確認された。また、施工中の発破記録に対して適用した結果も十分満足のいく結果であった。以上より、本方法により振動レベルの時間的変動を振動レベル計を用いずに段発速度波形から電卓程度の演算装置を用いて算出することが可能となったと考えられる。

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) 塩田正純：公害振動の予測手法，井上書院，1986。
 - 3) 北村泰寿：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，土木学会論文集，第362号，pp.481~484，1985。
 - 4) 国松 直・三浦房紀・今村 威・中川浩二：速度波形を用いた振動レベルの推定，土木学会論文集，第391号，pp.134~140，1988。
 - 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・三浦房紀・今村 威・中川浩二：振動レベル計の計算機によるシミュレーション，山口大学工学部研究報告，第39巻，第1号，pp.205~211，1988。
- (1988.12.2・受付)